DER WÄRMEÜBERGANG AN KÜHLRIPPEN

Von der Technischen Hochschule zu Breslau
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

DISSERTATION

Vorgelegt von

DIPL.-ING. GEORG WAGENER
aus Breslau

Referent: Prof. Dr.-Ing. H. BAER
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. HEINEL

Tag der mündlichen Prüfung:
16. Dezember 1929

Druck von R. Oldenbourg, München.

DER WÄRMEÜBERGANG AN KÜHLRIPPEN

Von der Technischen Hochschule zu Breslau
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs genehmigte

DISSERTATION

Vorgelegt von

DIPL.-ING. GEORG WAGENER

aus Breslau

Referent: Prof. Dr.-Ing. H. BAER
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. HEINEL

Tag der mündlichen Prüfung:

16. Dezember 1929

Druck von R. Oldenbourg, München.

Inhaltsangabe.

	Seite
Einleitung	5
Theoretische Unterlagen	6
Versuchseinrichtung	8
Versuche an einer ebenen Platte	13
Versuche an freistehenden Rippen	15
Einfluß der Rippenhöhe	20
Einfluß des Rippenabstandes	24
Einfluß des Materiales	26
Versuche an Kreisrippen	27
Zusammenfassung	30
Vergleich mit ähnlichen Versuchen	31
Berechnungsunterlagen	31
Literaturverzeichnis	32

Benutzte Formelzeichen.

α = WÜZ = Wärmeübergangszahl in kcal/m² h°.
α_0 = WÜZ einer ebenen Fläche.
k = WDZ = Wärmedurchgangszahl in kcal/m² h°.
λ = Wärmeleitzahl in kcal/m h°.
v = Luftgeschwindigkeit in m/s.
t = Temperatur (meistens Übertemperatur).
t_0 = Temperatur einer Oberfläche.
t_a, t_s = Übertemperatur am Fuß bzw. an der Spitze einer Rippe.
h = Rippenhöhe in m.
a = Rippenabstand von Spitze zu Spitze, mm.
δ = Rippenstärke in m.
n = Anzahl der Rippen.
l = Rippenlänge in m.
F = Oberfläche in m².
F' = Fläche zwischen den Rippen.
Q = Wärmemenge in kcal/h.

DEM VATER MEINER FRAU,

MAX PIPER, BRESLAU

IN DANKBARKEIT ZUGEEIGNET.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549827_0027

Einleitung.

Der Wärmeübergang zwischen einer Wand und einem umgebenden Medium ist gegeben durch die Formel

$$dQ = \alpha \cdot dF\,(t_0 - t_2)\ \text{kcal/h},$$

worin α die Wärmeübergangszahl in kcal/m², h und °C bedeutet. Während die Fläche F meistens konstruktiv, die Temperaturen t_0 und t_2 betriebstechnisch festliegen, kann man den Wert α, der in großem Maße vom Bewegungszustand des Mediums abhängig ist, in weiten Grenzen verändern. Eine Erhöhung von α ist vor allem durch Erhöhung der Geschwindigkeit des vorbeistreichenden Mediums möglich. Ist nun eine künstliche Bewegung des Mediums nicht möglich oder seine Geschwindigkeit ebenfalls betriebstechnisch gegeben, so bleibt als einziges Mittel zur Erhöhung der Wärmeabgabe bei gegebener »direkter« Heiz- oder Kühlfläche F die Anwendung von indirekten Heizflächen, den Rippenheizflächen, übrig. Die Verwendung von Rippen gestattet noch eine erhebliche Vergrößerung der Wärmeabgabe, d. h. bezogen auf die direkte Fläche eine solche der Wärmeübergangszahl α. Rippen kommen vor allem dort zur Anwendung, wo der Wärmeübergang auf einer Seite der Wand groß ist, während er auf der anderen Seite für die gegebene direkte Heizfläche durch andere Mittel nicht so gesteigert werden kann, daß der Wärmedurchgang das gewünschte Maß erreicht. Nun bedeutet aber die Erhöhung des Wärmeüberganges auf einer Seite nicht die gleiche Vergrößerung des Wärmedurchganges. Es kann nicht genug betont werden, daß eine einseitige Betrachtung in Wärmeübergangs- und Wärmedurchgangsfragen stets zu Irrtümern führen wird. Gerade in den vielerlei Zusammenhängen und Abhängigkeiten liegt ja die Schwierigkeit des gesamten Gebietes des Wärmeaustausches.

Die Wärmedurchgangszahl ist gegeben durch die Beziehung

$$1/k = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda}\left(1/\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\,\text{h}^0}\right),$$

in der die Abhängigkeit von den drei Stufen des Wärmedurchganges (Wärmeübergang durch Berührung und Strahlung — Wärmeleitung — Wärmeübergang) zum Ausdruck kommt. Beschränkt man die Betrachtung auf den Fall, daß die beiden Medien durch eine gut leitende dünne Wand getrennt sind, so kann man $\frac{\delta}{\lambda} \sim = 0$ setzen; dann ist also

$$k = \frac{1}{1/\alpha_1 + 1/\alpha_2}.$$

Setzt man nun noch α_1 als gegeben voraus, so ergibt die graphische Darstellung von

$$\frac{k}{\alpha_1} = f\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)$$

eine Parabel, die erst rasch, dann langsamer ansteigt, wobei ihre Neigung von

$$dk/d\alpha_2 = 1$$

steil fällt, um sich bald dem Wert 0 zu nähern. Der Größtwert, den k dabei erreichen kann, ist der Wert der kleineren Wärmeübergangszahl; z. B. wird für

$$\alpha_2 = \infty : k = \alpha_1,$$

wieweit dabei eine Steigerung von α_2 wirtschaftlich ist, kann nur von Fall zu Fall entschieden werden. Je kleiner der eine α-Wert ist, desto weniger Erhöhung von k bedeutet die Vergrößerung des anderen α-Wertes. Bei der Verwendung von Rippen ist also nicht bloß auf die Vergrößerung der Wärmeübergangszahl auf der Rippenseite zu achten, sondern auch abzuwägen, in welchem Verhältnis der Aufwand an Material und die damit verbundene Gewichts- und Preiserhöhung zu der erzielten Gesamtleistung steht.

Das Anwendungsgebiet der Rippen sind die Rippenrohre der Heizungen, Vorwärmer und Lufterhitzer, die Kühlbleche der Transformatoren und die Zylinder luftgekühlter Verbrennungsmaschinen. Ihre Anordnung erfolgte bis vor kurzem fast ausschließlich gefühlsmäßig oder nach gießtechnischen Gesichtspunkten. Die Forderung, billig und leicht zu fabrizieren, hat, besonders im Bau von luftgekühlten Verbrennungsmotoren dazu getrieben, rechnerische Unterlagen zu suchen, um mit möglichst wenig Aufwand die beste Wirkung zu erzielen.

Ein Beitrag zu dieser Forschung stellt die vorliegende Arbeit dar. Sie wurde ausgeführt im Maschinenlaboratorium der Technischen Hochschule zu Breslau unter Professor Dr.-Ing. H. Baer, dem für die Ermöglichung und Förderung der Arbeit besonderer Dank ausgesprochen sei; für die Unterstützung der Arbeit durch Geldmittel der Helmholtz-Gesellschaft sei dieser auch an dieser Stelle besonders gedankt.

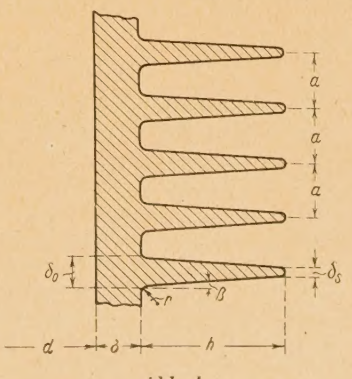


Abb. 1.

Über die Berechnung von Rippen finden sich in der Literatur über den Entwurf von Verbrennungsmotoren vereinzelte Angaben, die meist auf Erfahrungswerte zurückgehen; z. B. (s. Abb. 1):

Hanfland

$h = 0{,}35 \cdot d,$
$a = 0{,}1 \cdot d,$
$\delta_s = 2$ bis 2,5 mm,
$r = 0{,}018 \cdot d,$
$\beta = 2$ bis $2{,}5^0$.

Praetorius

$$\sigma = \frac{d \cdot pm}{1600} + 4 \text{ mm}$$
$h = 4 \cdot \sigma,$
$a = 2 \cdot \sigma,$
p_m = mittl. eff. Druck in at.

Bussien

$h = 30$ bis 40 mm,
$a = 8$ bis 9 mm,
$\delta_0 = 5$ mm,
$\delta_s = 2$ mm.

Dazu treten einmal mathematische Ableitungen in der Literatur über Wärmeaustausch, deren Anwendungsmöglichkeit für allgemeine Fälle jedoch nicht feststeht. Ferner Zahlenmaterial aus Firmenversuchen (z. B. Föge, Hannover, und Schilde, Hersfeld), die den Firmen brauchbare Unterlagen bei der Wahl der Rippenabmessungen geben, darüber hinaus aber keine allgemeine Anwendung gestatten. Erst in letzter Zeit mehren sich die praktischen und theoretischen Versuche, die Unsicherheit auf diesem Gebiet zu beseitigen. Hauptsächlich der Bau luftgekühlter Flugmotoren hat hier wertvolle Versuche gezeitigt, wie die von Professor Gibson, England, und von Dr.-Ing. Goßlau, Berlin. Daneben stehen eingehende theoretische Untersuchungen; die ersten Formeln auf diesem Gebiet stammen meines Wissens von Lacoin, Paris; er ermittelt die günstigste Rippenform, die nach ihm von zwei sich in der Spitze berührenden Kreisbögen begrenzt wird. Weiter untersucht Dr.-Ing. Schwarz die günstigsten Maßverhältnisse für die Kühlbleche von Transformatoren. Eine eingehende theoretische Arbeit über die Frage der Rippenform gibt Prof. Dr.-Ing. Schmidt, Danzig; ihre Werte sind im nächsten Abschnitt zusammengestellt. Der Zweck der vorliegenden Arbeit ist einmal, die theoretischen Grundlagen zusammenzustellen, ihre Gültigkeit durch den Versuch nachzuprüfen und schließlich zu zahlenmäßigen Unterlagen für die Berechnung zu kommen.

Theoretische Unterlagen.

Um Formeln für die Temperaturverhältnisse und Wärmeabgabe von Rippen zu erhalten, müssen zunächst folgende Voraussetzungen gemacht werden:

Es soll eine freistehende, gerade Rippe betrachtet werden, deren Wärmeabgabe durch Strahlung zunächst nicht mitberücksichtigt wird. In diesem Falle kann man ausgehen

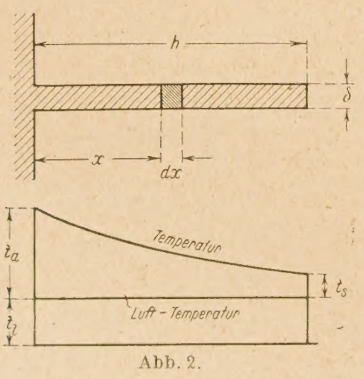


Abb. 2.

von der Betrachtung eines Stabes, dessen Ende $x = 0$ auf einer konstanten Temperatur gehalten wird, und der sich in einer Umgebung befindet, die überall gleiche Temperatur hat (s. Abb. 2). Diese Umgebungstemperatur sei $t_l = 0$ gesetzt. Die Temperatur an der Stelle $x = 0$ sei t_a; es ist zu beachten, daß wegen $t_l = 0$ alle vorkommenden Temperaturen als Übertemperatur auftreten. Der Querschnitt des Stabes sei f, wobei seine Dicke δ und seine Breite l bedeuten sollen ($f = \delta \cdot l$). Die Ausdehnung in Richtung x sei als Höhe mit h bezeichnet; alle Abmessungen sind in Metern einzusetzen.

Für ein unendlich kleines Stabelement an der Stelle x von der Höhe d_x gilt die Wärmebilanz

$$q_{\mathrm{I}} = q_{\mathrm{II}} + q_{\mathrm{III}}, \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

darin ist

$$q_{\mathrm{I}} = -\lambda \cdot f \cdot \left(\frac{dt}{dx}\right)_x \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

$$q_{\mathrm{II}} = -\lambda \cdot f \cdot \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x+dx} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

hierin ist λ die Wärmeleitzahl in Kalorien/m h^0, $\frac{dt}{dx}$ das Temperaturgefälle an der Stelle x bzw. $x + dx$; das negative Vorzeichen gilt, weil mit wachsendem x die Temperatur sinkt. Für den Wärmeübergang gilt

$$q_{\mathrm{III}} = \alpha \cdot U \cdot dx \cdot t_x \text{ kcal/h}, \quad \ldots\ldots \quad (4)$$

worin α die WÜZ, U der Umfang des Stabes ($U = 2 \cdot l + 2\,\delta$, d. h. $\simeq 2 \cdot l$) und t_x die Übertemperatur an der Stelle x ist. Damit ergibt sich

$$-\lambda \cdot f \left(\frac{dt}{dx}\right)_x = -\lambda \cdot f \cdot \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x+dx} + \alpha \cdot U \cdot dx \cdot t_x.$$

Nun ist:

$$\left(\frac{dt}{dx}\right)_{x+dx} - \left(\frac{dt}{dx}\right)_x = \frac{d^2 t}{dx^2} \cdot dx,$$

also:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = \frac{\alpha \cdot U}{\lambda \cdot f} \cdot t_x \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Die Lösungsbedingung für die Differentialgleichung ist, daß sich die Funktion der Temperatur bei zweimaliger Differentation nur um einen konstanten Faktor ändert. Dies ist der Fall bei der Sinus, Cosinus und Exponentialfunktion. Da der Temperaturverlauf längs des Stabes nicht periodisch sein kann, kommt nur die letzte Funktion als Lösung in Frage, etwa in der Form $t = C \cdot e^{m \cdot x}$, dann ist

$$\frac{dt}{dx} = C \cdot m \cdot e^{mx}$$

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = C \cdot m^2 \cdot e^{mx},$$

also

$$C \cdot m^2 \cdot e^{mx} = \frac{\alpha \cdot U}{\lambda \cdot f} \cdot t = \frac{\alpha \cdot U}{\lambda \cdot f} \cdot C \cdot e^{mx},$$

darin ist

$$m^2 = \frac{\alpha\, U}{\lambda f}; \qquad m = \pm \sqrt{\frac{\alpha\, U}{\lambda \cdot f}}$$

da beide Vorzeichen für m möglich sind, lautet die Lösung

$$t = C_1 \cdot e^{+mx} + C_2 \cdot e^{-mx} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Die Konstanten sind auf Grund der Grenzbedingungen zu ermitteln; für $x = 0$ wird

$$t = t_a = C_1 + C_2,$$
$$C_2 = t_a - C_1,$$

für $x = h$ kann $(q_{\mathrm{II}})_h = 0$ gesetzt werden, weil entweder die Wärmeabgabe der Stirnfläche als vernachlässigbar angesehen werden kann, oder bei Verjüngung des Stabes zu einer Spitze tatsächlich Null ist. Dann ist

$$-\lambda \cdot f \cdot \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=h} = 0$$

$$\left(\frac{dt}{dx}\right)_h = 0.$$

Nun ist

$$t = C_1 \cdot e^{+mx} + (t_a - C_1) \cdot e^{-mx}$$

$$= C_1 (e^{+mx} - e^{-mx}) + t_a \cdot e^{-mx}, \quad \ldots \quad (7)$$

damit wird

$$0 = \left(\frac{dt}{dx}\right)_h = m \left[C_1 \left(e^{+mh} + e^{-mh}\right) - t_a \cdot e^{-mh}\right]$$

$$C_1 (e^{+mh} + e^{-mh}) = t_a \cdot e^{-mh}$$

$$C_1 = \mathrm{ta} \cdot \frac{e^{-mh}}{e^{+mh} + e^{-mh}} \quad \ldots \quad (8)$$

$$C_2 = t_a \left(1 - \frac{e^{-mh}}{e^{+mh} + e^{-mh}}\right)$$

$$= t_a \cdot \frac{e^{+mh}}{e^{+mh} + e^{-mh}}, \quad \ldots \quad (9)$$

dafür kann man auch schreiben

$$C_1 = \frac{t_a}{2} \cdot (1 - \mathfrak{Tang}\, mh) \quad \ldots \quad (8a)$$

$$C_2 = \frac{t_a}{2} (1 + \mathfrak{Tang}\, mh), \quad \ldots \quad (9a)$$

der Temperaturverlauf ist demnach

$$t = C_1 \cdot e^{+mx} + C_2 \cdot e^{-mx} \quad \ldots \quad (10)$$

mit den obenstehenden Konstanten. Besonders interessiert die Temperatur an der Spitze ($x = h$). Hier wird

$$t_s = \frac{2\, t_a}{e^{+mh} + e^{-mh}},$$

da $e^{+mh} \cdot e^{-mh} = 1$ ist; ferner ist

$$^1/_2 (e^{+mh} + e^{-mh}) = \mathfrak{Cof}\, mh,$$

die Übertemperatur an der Spitze wird somit

$$t_s = \frac{t_a}{\mathfrak{Cof}\, mh} \quad \ldots \quad (11)$$

und das Verhältnis der Übertemperaturen

$$\frac{t_s}{t_a} = \frac{1}{\mathfrak{Cof}\, mh} \quad \ldots \quad (11a)$$

Die Wärmeabgabe einer Rippe durch Wärmeübergang ist

$$q_{III} = \alpha \cdot U \cdot t_x \cdot dx$$

für das unendlich kleine Flächenstück f von der Höhe dx; für die ganze Rippe demnach

$$Q = \int_0^h \alpha\, U\, t_x \cdot dx.$$

worin

$$t_x = C_1 e^{+mx} + C_2 \cdot e^{-mx};$$

die Integration ergibt

$$Q = \frac{\alpha \cdot U}{m} [C_1 (e^{+mh} - 1) - C_2 (e^{-mh} - 1)]$$

$$= t_a \cdot \frac{\alpha\, U}{m} \frac{e^{-mh} (e^{+mh} - 1) - e^{+mh} (e^{-mh} - 1)}{e^{+mh} + e^{-mh}}$$

$$= t_a \cdot \frac{\alpha\, U}{m} \cdot \frac{1 - e^{-mh} - 1 + e^{+mh}}{e^{+mh} + e^{-mh}}$$

$$= t_a \cdot \frac{\alpha\, U}{m} \cdot \mathfrak{Tang}\, mh \quad \ldots \quad (12)$$

$$= t_a \cdot l \cdot \sqrt{2\, \alpha\, \lambda\, \delta} \cdot \mathfrak{Tang} \sqrt{\frac{2\, \alpha}{\lambda\, \delta}} \cdot h,$$

denn es ist

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot U}{\lambda \cdot f}},$$

$$U \sim 2 \cdot l; \qquad f = l \cdot \delta,$$

also

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot 2 \cdot l}{\lambda \cdot \delta \cdot l}} = \sqrt{\frac{2\, \alpha}{\lambda\, \delta}}.$$

Für eine einzelne, freistehende, gerade Rippe, deren Wärmeabgabe durch Strahlung zu vernachlässigen ist, gilt also

$$t_s = t_a \cdot \frac{1}{\mathfrak{Cof}\, mh}\ ^0 \text{üb.} \quad \ldots \quad (11)$$

$$Q = t_a \cdot l \cdot \sqrt{2\, \alpha\, \lambda\, \delta} \cdot \mathfrak{Tang} \sqrt{\frac{2\, \alpha}{\lambda\, \delta}} \cdot h \frac{\text{kcal}}{\text{h}}; \quad \ldots \quad (12)$$

wieweit diese Beziehungen auch für allgemeine Fälle gültig sind, soll der Versuch zeigen. Denn einmal ist die Bedingung »freistehend«, d. h. keine Beeinflussung durch benachbarte Flächen in der Praxis nie erfüllt, und zweitens haben wir es nicht nur mit geraden Rippen (rechteckiger Querschnitt), sondern auch mit anderen Rippenformen zu tun. Daß die Form der Rippe auf ihre Wärmeabgabe von Einfluß sein wird, leuchtet ein. Ihre Form muß ja zwei Aufgaben möglichst gut erfüllen, erstens den Wärmetransport im Material, zweitens die Wärmeabgabe nach außen. Eine nach außen verjüngte Rippe wird immer wirtschaftlicher sein als eine von gleichem Querschnitt, denn mit der nach außen abnehmenden Wärmemenge kann auch der Leitungsquerschnitt abnehmen. Ebenso wird die verjüngte Rippe auch strömungstechnisch besser sein. Unter vereinfachenden Annahmen lassen sich der günstigste Querschnitt sowie die günstigsten Maßverhältnisse bei anderen Querschnitten rechnersich bestimmen. Die von Professor Dr. Schmidt berechneten Werte sind in der Zahlentafel 1 zusammengestellt.

	Profil			
	Parabel	Dreieck	Rechteck	Faktor
Höhe der Rippe: h	1	0,842	0,796	$\frac{Q}{\alpha\, t_a\, l}$
Stärke am Fuß: δa	1	0,828	0,631	$\frac{Q^2}{\alpha\, \lambda\, t_a{}^2\, l^2}$
Querschnitt F	1/3	0,349	0,502	$\frac{Q^3}{\alpha^2\, \lambda\, t_a{}^3\, l^3}$
F/F_{max}	1	1,044	1,5	—
t_s/t_a	0	0,277	0,457	—

Q: Wärmeabgabe einer Rippe
α: Wärmeübergangszahl kcal/m² h°; λ: Wärmeleitzahl
t_a: Übertemperatur am Fuß, t_s: Übertemp. an der Spitze
h = Höhe, δ = Stärke, l = Länge der Rippe in m
F = Querschnitt der Rippe in m².

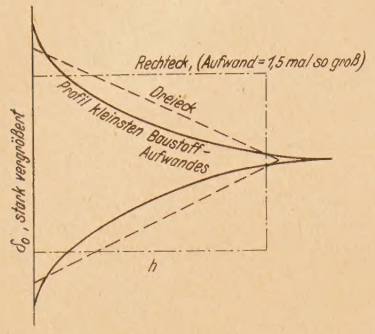
Zu ähnlichen oder denselben Ergebnissen kommen die anderen bereits genannten Arbeiten.

Die Einhaltung der Beziehungen ergibt den geringsten Baustoffaufwand, natürlich müssen die Ergebnisse der Berechnung mit den Forderungen der Ausführung in der Praxis in Einklang gebracht werden. Die günstigste Rippenform z. B. scheidet wegen der schwierigen Herstellung und der empfindlichen messerscharfen Spitze meist überhaupt aus. Die Anordnung der Dreieckrippe wird sich fast immer empfehlen, die Einhaltung der Maßverhältnisse ist anzustreben, wirkt sich jedoch erst bei größeren Abmessungen der Rippen aus, da die Stärke am Fuß der Rippe, wie sie sich aus der Rechnung ergibt, meist unterhalb der gießtechnisch möglichen liegt.

Wie steht es nun mit der bisher vernachlässigten Strahlung der Rippe? Bei einer freistehenden Rippe darf diese

besonders bei hohen Temperaturen nicht unberücksichtigt bleiben. Sie wird in diesem Falle nach der Strahlungsformel

$$Q_{Str} = C \cdot F \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$



Zahlentafel 1.

errechnet, worin

$$C = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 - 1/C_0}$$

den Strahlungsfaktor darstellt, F die Oberfläche der Rippenflanke, T_1 die mittlere absolute Temperatur der Rippe, T_2 die der umgebenden Flächen. Dabei ist Q_{Str} die gesamte Strahlungswärme der Rippe, da ja jede Seite wegen der senkrecht zur Rippe verlaufenden Grundfläche, die selbst höhere Temperatur als die Rippe hat, nur halb wirksam ist. Bei nebeneinanderstehenden Rippen bestrahlen sich die beiden Flächen zum Teil gegenseitig, so daß hier die Wärmeabgabe durch Strahlung größtenteils aufgehoben ist; nur ein geringer Teil der Strahlung tritt schräg aus. Die Flächenteilchen einer Rippenflanke, die außen liegt und ein größeres Strahlenbündel schräg austreten lassen könnten, haben dabei geringe Übertemperatur, die Flächenteilchen hoher Übertemperatur liegen innen und können nur ganz wenig wirksam sein. Das Ergebnis ist somit, daß die Wärmeabgabe durch Strahlung klein gegenüber der durch Berührung ist und ohne Bedenken vernachlässigt werden kann.

Versuchseinrichtung.

Die Versuchseinrichtung sollte ermöglichen, die Abhängigkeit des Wärmeüberganges von Rippenhöhe, Rippenabstand (Teilung) und Material bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten zu ermitteln.

Die meisten Versuche wurden an ebenen Rippenelementen ausgeführt, um die Unterschiede hinsichtlich Temperaturverteilung und Wärmeübergang auszuscheiden, wie sie an Zylinder und Kreisringrippe im Luftstrom auftreten. Auf diese Weise ergab sich als Wärmequelle ein viereckiger, elektrisch beheizter Kasten, auf dem die Rippenelemente als Deckel so saßen, daß ihre Grundflächenoberkante mit der Unterkante des Windkanales abschnitten.

Der Heizkasten besteht aus einem inneren Kasten aus Eisenblech von 200 × 200 mm l. W., der von einem ebensolchen Kasten von 250 × 250 mm l. W. umgeben und mit

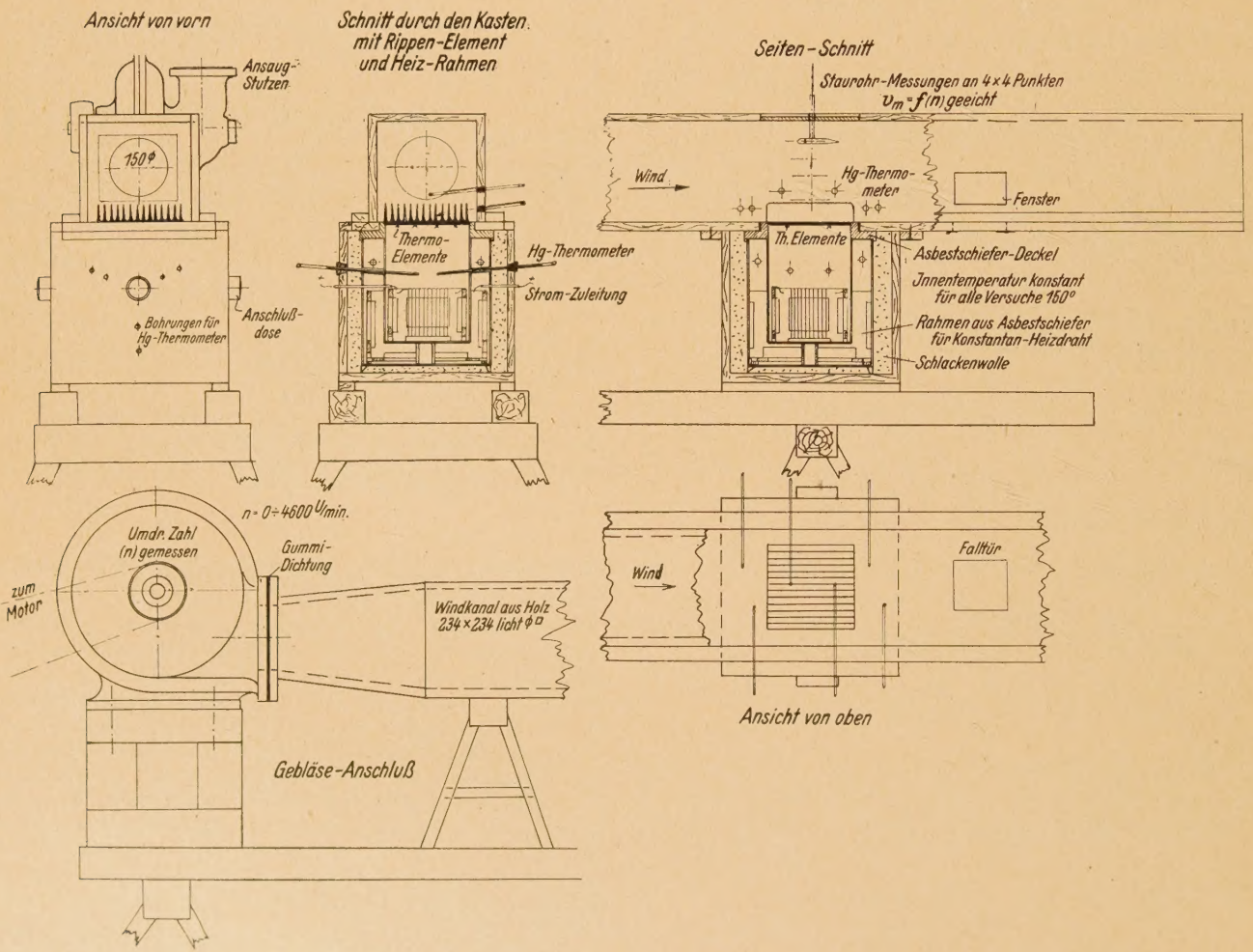


Abb. 3. Aufbau der Versuchseinrichtung.

Abb. 9.

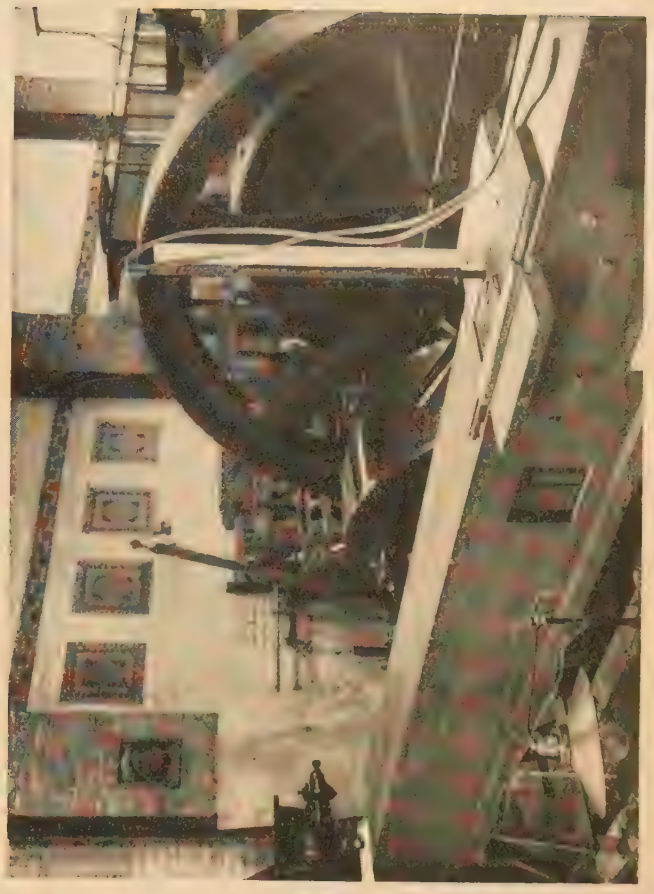


Abb. 10.

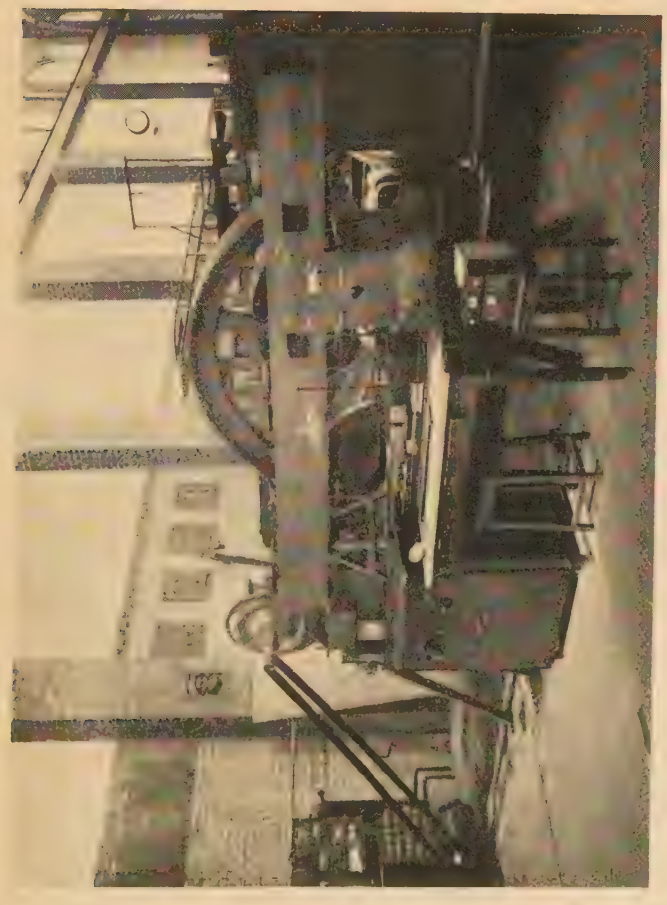


Abb. 7.

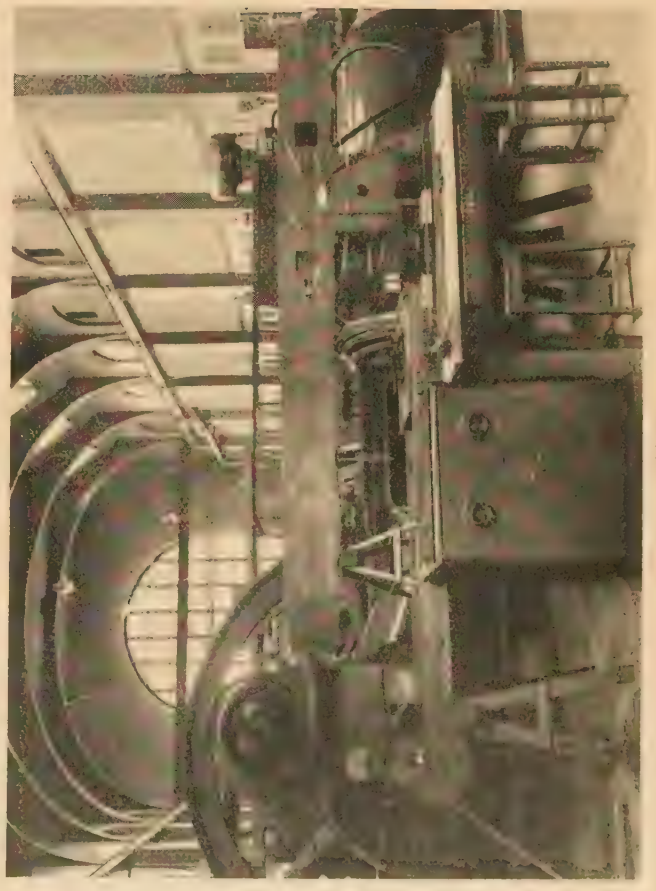


Abb. 8.

ihm unten durch ein 50 mm hohes Porzellanrohr an den Seiten durch vier 10 mm weite Blechrohre verbunden ist, die gleichzeitig zur Durchführung der Thermometer dienen.

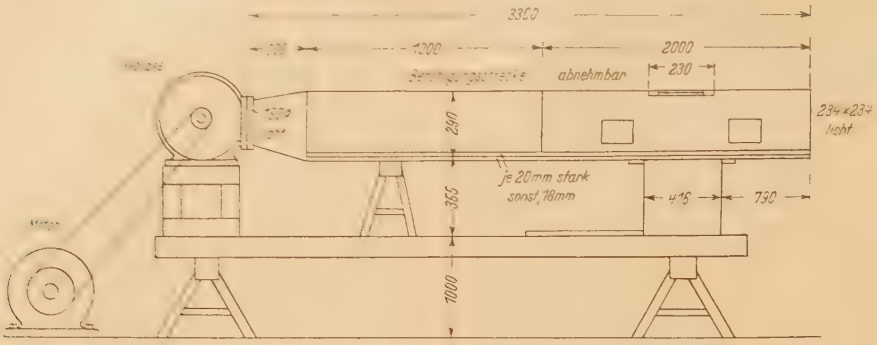


Abb. 3a. Hauptabmessungen der Versuchs-Einrichtung.

Der innere Kasten schwebt also mit 50 mm Randabstand in dem äußeren. Über beide hinweg ragt ein Deckel aus Asbestschiefer, in dessen Öffnung von 200 × 200 mm die Rippenelemente eingesetzt und eingegipst werden.

Der innere Kasten enthält ringsherum auf passenden Asbestschieferrähmchen die Hauptheizung. Diese besteht

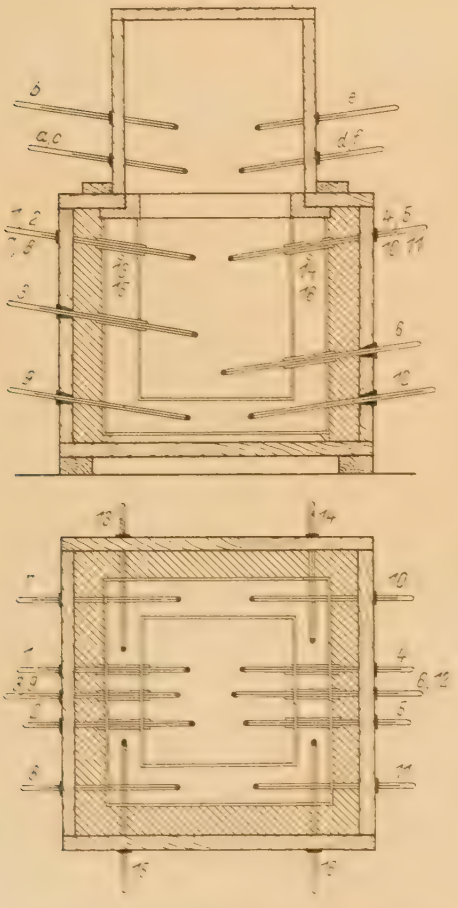
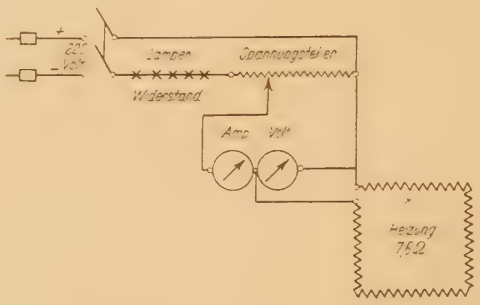


Abb. 4. Temperatur-Meß-Stellen im Kasten.

aus 0,8 mm starkem Konstantandraht mit einem Widerstand von 7,6 Ohm. Die Hauptheizung ist über einen Lampenwiderstand und einen Spannungsteiler (Siemens & Halske) ans Netz des Maschinenlaboratoriums angeschlossen. Der äußere Kasten enthält ebenfalls an den vier Wänden und außerdem auf dem Boden auf Asbestschieferrähmchen aus demselben Draht die Hilfsheizung von 16,9 bzw. 4,8 Ohm Widerstand. Ihre Regelung erfolgt getrennt für Seitenwände und Grundfläche durch Lampenwiderstände und durch veränderliche Widerstandsspulen. Beide Kästen befinden sich, ringsherum durch Schlackenwolle isoliert, in



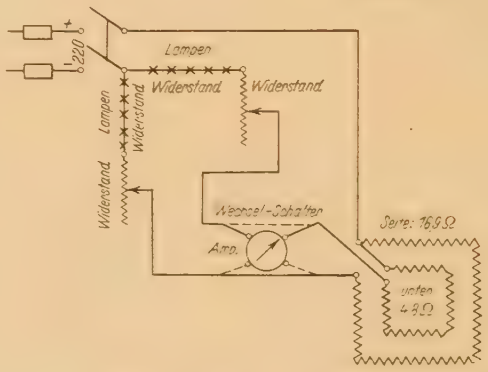


Abb. 5. Schaltung der Heizung.

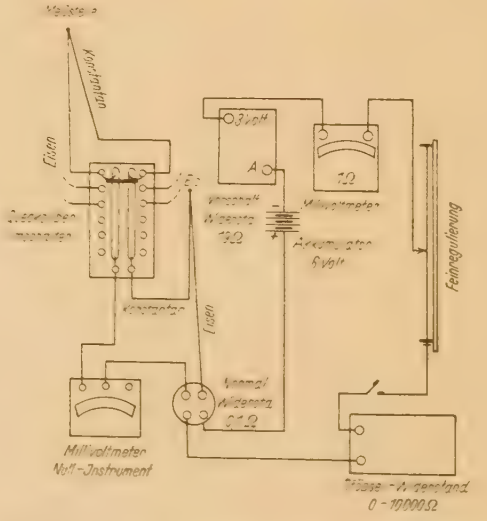
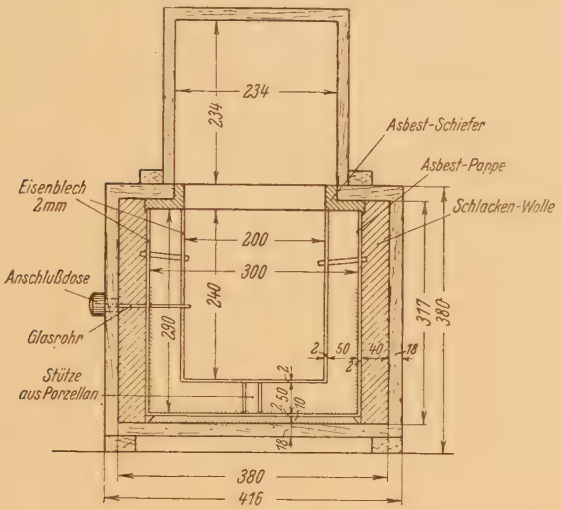


Abb. 6. Kompensations-Schaltung der Thermo-Elemente.

einem stabilen Holzkasten. In den inneren Kasten ragen sechs, in den äußeren zehn Quecksilberthermometer. Der Zweck der Anordnung ist folgender:

Innerer und äußerer Kasten werden auf die gewünschte Temperatur (150°) geheizt. Dadurch, daß der äußere Kasten dieselbe Temperatur hat wie der innere, kann die innen zugeführte Wärme nur nach der einzigen Stelle, an der ein Temperaturgefälle vorhanden ist, d. h. nach oben durch das Rippenelement fließen; die innen gemessene elektrische Energie kann somit direkt der vom Rippenelement abgegebenen Wärme gleichgesetzt werden. Die Schaltung der Heizungsstromkreise zeigt Abb. 5. In der Hauptheizung liegt ein Präzisionsdoppelinstrument für Strom- und Spannungsmessung von Siemens & Halske. In der Schutzheizung wurde nur die Stromstärke gemessen, und zwar durch Umschaltung mit einem Doppelschalter abwechselnd mit einem Präzisionsstrommesser. Die übrigen Einzelheiten der Versuchseinrichtung sind in den Abb. 3 bis 11 zu sehen.



Wärmedurchgangszahl: Seitenwand: 1,314 kcal/m²h°
unten : 1,034 kcal/m²h°
zu Grunde liegen: Wärmeleitzahl: Asbest 0.14;
Eisen 50; Holz 0,15; Schlackenwolle: 0,10 kcal/mh°.
Wärmeübergangszahl: innen 14 kcal/m²h°, außen 7,0.
Größe der mittleren Flächen: Seite: 0,52 m²
unten: 0,129 m².
Temperatur: innen 150°, unten 155°, außen 25°.

Abb. 11.

Die Entnahme des Stromes mußte aus dem Netz erfolgen, weil die Akkumulatorenbatterie des Laboratoriums beim Umbau ausgebaut wurde und für die oft während 14 Tagen ununterbrochene Stromentnahme eine kleinere nicht ausgereicht hätte. Die Gleichmäßigkeit der Spannung war, außer wenn eine kleinere Betriebsmaschine lief, trotzdem gut.

Die innere Heizung deckt also nur die Wärmeabgabe der Rippenplatte, die jeweilig als Deckel den oberen Abschluß des inneren Kastens bildet; die äußere Heizung deckt die Wärmeverluste des äußeren Kastens durch die Isolierschicht und den Holzkasten hindurch nach außen. Eine überschlägige Rechnung für den Wärmeverlust des Gesamtkastens mit den bei den Versuchen gemessenen WÜZ und Temperaturen (Abb. 11) ergibt die durchgehende Wärmemenge zu 102,32 kcal/h. Gemessen ist unten eine Stromstärke von 1,8 A bei 8,7 V, an der Seite 2,5 A bei 42,2 V. Die gemessene Wärmemenge ist also

$$0{,}86\ (1{,}8 \cdot 8{,}7 + 2{,}5 \cdot 42{,}2) = 104{,}2\ \text{kcal/h}.$$

Die Temperaturen im Kasten wurden mit Quecksilberthermometern gemessen, die im Ölbade durch Vergleich mit einem Reichsanstaltsthermometer geeicht waren. Die Übereinstimmung der Ablesung an den verschiedenen Stellen war gut.

Zur Messung der Oberflächentemperaturen an den Rippenelementen dienten Thermoelemente aus Eisen- und Konstantandraht von 0,5 mm Dmr. Die Drähte waren 1,5 m lang und mit Seide isoliert. Als Schaltung der Thermoelemente wurde die Kompensationsschaltung von Lindeck-Rothe gewählt (s. Abb. 6). Als Gegenspannung diente die einer 6-Volt-Akku-Batterie, die durch einen Stöpselwiderstand in Stufen von 1 Ohm bis 10000 Ohm und einen Widerstandsdraht von 0 bis 1,5 Ohm verändert werden konnte. Das Nullinstrument von Siemens & Halske hatte 480 Ohm Widerstand. Zur Ablesung der Spannung diente ein Milli-Volt-Instrument von 1 Ohm Widerstand derselben Firma. Diesem Instrument ist ein Widerstand von 19 Ohm vorgeschaltet. Dabei entspricht der Größtausschlag des Zeigers

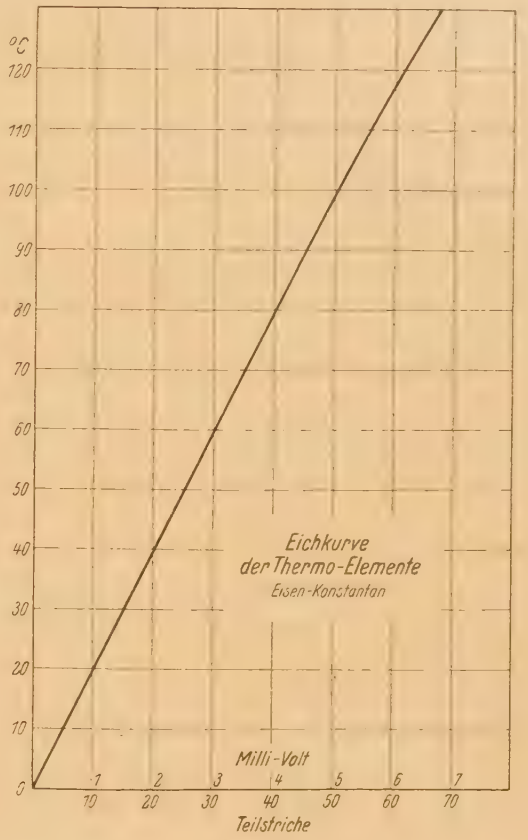


Abb. 12.

= 150 Teilstrichen einer Spannung von 3 V. Bezeichnet w die Größe des Abzweigwiderstandes, W die des Instrumentes, e die gesuchte EMK, E die abgelesene Spannung, so ist

$$e = i \cdot w; \quad E = i \cdot W$$

$$e = \frac{E \cdot w}{W} = E \cdot \frac{0{,}1}{20}.$$

Die Ablesung bei 100° beträgt z. B. 51,7 Teilstriche $= \frac{51{,}7 \cdot 3}{150}$ V.

Also ist

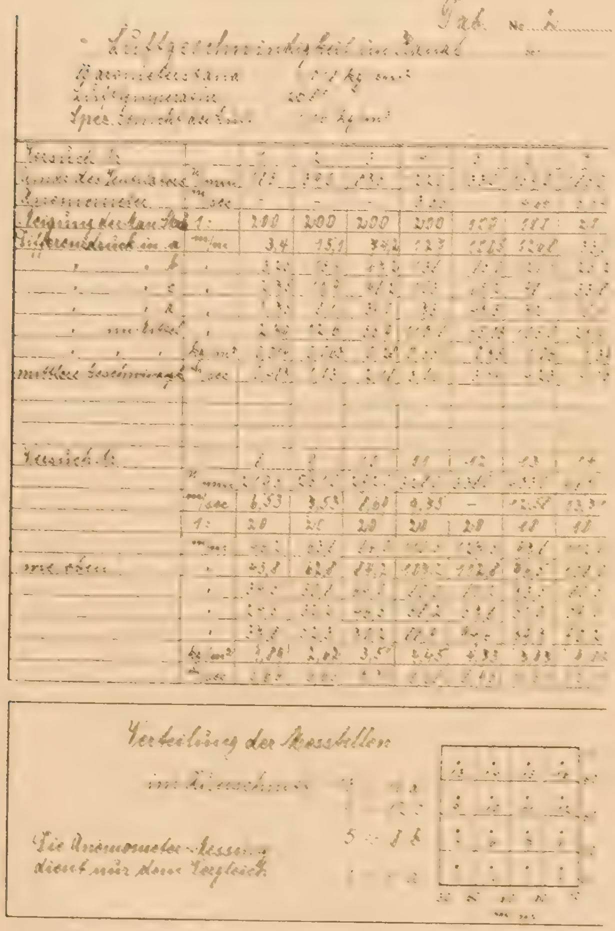
$$e = \frac{51{,}7 \cdot 3 \cdot 0{,}1}{150 \cdot 20} = 51{,}7 \cdot 10^{-4} = 5{,}17\ \text{Millivolt}.$$

Die Thermoelemente wurden im Ölbad durch Vergleich mit einem Satz Reichsanstaltsthermometern geeicht. Vor der Eichung wurden sie mit einem Strom von ca. 1 A 24 Stunden lang einer künstlichen Alterung unterzogen. Zwischen verschiedenen Elementen aus demselben Drahtvorrat zeigte sich keine Abweichung, so daß eine gemeinsame Eichkurve für alle verwendet werden konnte. Wiederholte Nacheichungen ergaben ebenfalls keine Änderung. Die Werte der Eichung zeigt Abb. 12; die Kurve folgt in dem benutzten Bereich dem Gesetz

$$e = 0{,}0518 \cdot t^{0{,}997}.$$

Da $^{1}/_{10}$ Teilstrich noch geschätzt werden kann, beträgt die Ablesegenauigkeit 0,2 °.

Die Thermoelemente wurden durchwegs an der Meßstelle angelötet und auf einer Länge von 10 cm in 1,5 mm tiefen und ebenso breiten Rillen, die im Material eingesägt waren, verlegt. Bei Aluminium wurde die Lötstelle verhämmert, wodurch eine innige Verbindung zwischen dem Lötzinn und dem Aluminium erzielt wurde. Bei der Messung der Temperatur an der Rippenspitze wurde die Spitze von der Meßstelle bis zur senkrechten Kante längs der Rippe weggenommen und die zusammengedrehten Drähte von der Meßstelle aus, mit kleinen Drahtreiterchen befestigt, auf der Rippe entlang geführt. Wie wichtig es ist, die Drähte genügend weit im Material, d. h. in gleicher Temperatur

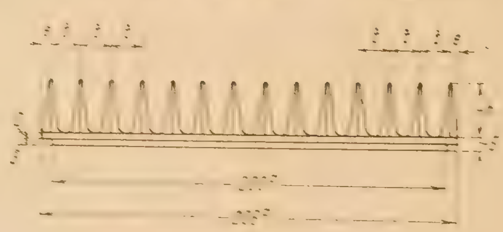


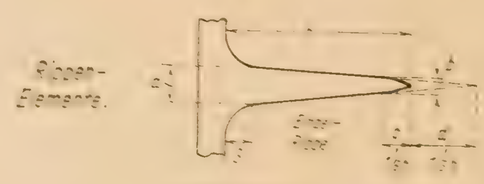
Zahlentafel 2.

wie an der Meßstelle zu führen, wurde auch hier wieder bei den Vorversuchen bestätigt. Die Thermoelemente wurden an den Quecksilberumschalter mit gemeinsamer Eisstelle geführt. Die Lufttemperatur wurde an 6 Punkten im Luftkanal vor, über und hinter den Rippen mit Quecksilberthermometern gemessen.

Für die Bewegung der Luft an den Rippen diente ein von einem Elektromotor mittels Riemen getriebenes Gebläse, das die Luft durch den 3,3 m langen Holzkanal von $234 \cdot 234$ mm² l. W. drückte. Die Luftgeschwindigkeit wurde durch Veränderung der Umdrehungszahl des Motors mittels Spannungsteiler eingestellt und war zwischen 0 und 12 m/s regelbar. Die Luft ging vom Gebläse aus durch eine 1,3 m lange Beruhigungsstrecke mit diagonalen Blechen und verließ 1,0 m hinter den Rippen den Kanal. Die Kanalhaube war in einer Länge von 2,0 m über dem Kasten abzuheben; sie enthielt vier Beobachtungsfenster sowie über dem Kasten einen Deckel mit Fenster, das mit einem Holzschieber innen abgedeckt war. Die Luftgeschwindigkeit sollte ursprünglich vor und hinter dem Rippenelement mit Anemometer gemessen werden, für die zwei entsprechende Falltüren im Kanalboden vorgesehen waren. Da diese Messung für die verschieden geformten Rippen keine gleichwertigen Zahlen ergeben konnte, wurde eine Ermittlung der Luftgeschwindigkeit über den ganzen Querschnitt in Abhängigkeit von der Umdrehungszahl des Gebläses mit einem Staurohr und Mikromanometer nach Schultze-Krell vorgenommen. Zu diesem Zweck wurde an Stelle des Klappdeckels über dem Kasten in der Kanaloberwand ein Schieber-

Modell Nr	Höhe mm	Abstand	Stärke a. Fuss	" a. d. Spitze	Zuspitzung	Schnittpunkt	Kante	
Nr	h	t	a	b	c	d	e	Bemerkung
1	10	10	3	1	1,7	3,3	3,0	Gusseisen
2	20	10	3	1	3,3	6,6	3,0	"
3	30	10	3	1	5,0	10,0	3,0	1 x Gusseisen 1 x Aluminium
4	40	10	3	1	6,7	13,3	3,0	Gusseisen
5	20	6	3	1	3,3	6,6	4,0	"
6	20	8	3	1	3,3	6,6	3,0	"
7	20	15	3	1	3,3	6,6	5,5	1 x Gusseisen 1 x Aluminium
8	20	20	3	1	3,3	6,6	3,0	Gusseisen
9	25 (?)	9	3	1	4,5 (?)	9,0 (?)	4,0	"
10	15	15	3	1	2,5	5,0	5,5	"
11	20	10	4	1,2	3,3	6,6	3,0	"
12	50	—	6	2,0	8,3	16,7	—	1 Rippe in der Mitte
13	50	15	6	2,0	8,3	16,7		2 Rippen dito
14	50	15	6	2,0	8,3	16,7		3 Rippen dito





Zahlentafel 3.

deckel (Abb. 10) angebracht, auf dem ein zweiter kleinerer Schieber senkrecht zur Richtung des ersten verschoben werden konnte. In dem kleineren war ein Stück Rohr innen abschneidend eingelassen, in dem das Staurohr mit einer Klemmschraube festgehalten werden konnte. Auf diese Weise war jeder Punkt über der Platte nach drei Skalen einstellbar abzutasten. Die hierbei gemessenen Werte zeigt Zahlentafel 2 und Abb. 13. Darin sind die Meßstellen *a* (1 bis 4) 30 mm, *b* (5 bis 8) 90 mm, *c* (9 bis 12) 150 mm und *d* (13 bis 16) 210 mm über Unterkante Kanal. Die so gefundene mittlere Geschwindigkeit weicht von der mit Anemometer gemessenen etwas ab, ist aber von der Art der untersuchten Rippenelemente unabhängig. Bei allen

Versuchen wurde nur noch die Umdrehungszahl des Gebläses (beim Einregulieren mit Tachometer, bei der Messung mit Tachoskop) gemessen und aus der Eichkurve die zugehörige Geschwindigkeit entnommen.

Zur Untersuchung kamen:

Eine Platte aus Gußeisen, unten bearbeitet, oben unbearbeitet, 200 × 200 m/m, 5 mm stark. An ihr sollten die Ausgangswerte ermittelt werden, außerdem war durch Ver-

Erläuterung der Versuchs-Protokolle Tab. № 4

Vers. Nr.	
Datum	
Stromstärke a	Nach Eintritt des Beharrungszustandes mit
Spannung V	einem Präzisions-Instrument gemessen
Heizleistung	$Q = 0{,}86 \cdot a \cdot V$ Kcal/h
Stromstärke außen	Hilfsstrom (Stromkreis an der Seite
innen	" im äußeren Kasten unten
Temperatur innen	4 Hg-Thermometer im inneren Kasten
" der Oberfl.	2-P Thermo-Elemente eingelassen in der Unters.
" außen	6 Hg-Thermometer im Luftkanal
" "	der zweite Vert. stellt die Temp im Luftkanal vor
	Platte das 2 Hg-Thermometer
Temp. Unterinnen	2 Hg-Therm im inneren Kasten unten
" " außen	2 Hg-Therm im äußeren Kasten unten
" im Kanal	8 Hg-Therm " " " an den Seiten
" " Raum	1 Hg-Therm am Versuch
Temp. Differenz innen	Temp innen — Temp der Oberfl
" " außen	Temp der Oberfl — Temp innen
" im ganzen	Temp innen — Temp. außen
Umdr des Gebläses	mit Tachoskop gemessen
Luftgeschwindigk.	aus der Eichkurve
α_1 innen	$Q = [0{,}0400 \text{ (Temp. Diff. innen)}]$ Kcal/m²h°
" außen α_2	$Q = [0{,}0416 \text{ (Temp. Diff. außen)}]$ " "

Zahlentafel 4.

gleich der an der Platte gefundenen Werte mit ähnlichen Versuchen eine Kontrolle der Versuchseinrichtung möglich.

Zweitens dieselbe Platte mit einer, zwei und drei Rippen in der Mitte von 50 mm Höhe und 15 mm Abstand, um die theoretische Berechnung, die sich für eine freistehende Rippe

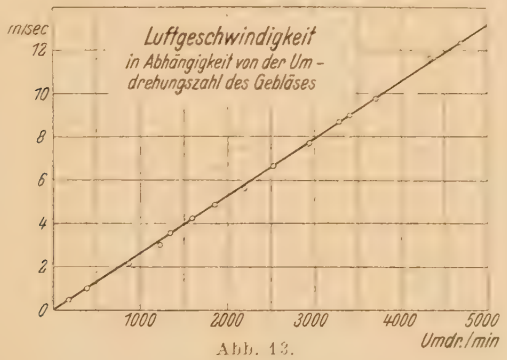


Abb. 13.

durchführen läßt, mit dem Versuch zu vergleichen und Abhängigkeiten der gegenseitigen Beeinflussung von 2 und 3 Rippen zu erhalten.

Drittens eine Serie von Rippenelementen mit gleichem Abstand der Rippen ($a = 10$ mm) und verschiedenen Rippenhöhen ($h = 10$ bis 40 mm).

Viertens eine Serie von Rippenelementen mit gleicher Rippenhöhe ($h = 15$ mm) und verschiedener Teilung ($a = 6$ bis 15 mm).

Fünftens zwei Aluminiumrippenelemente.

Sechstens zwei Messingzylinder mit aus dem Vollen gedrehten Kreisrippen bei gleicher Teilung ($a = 15$ mm) und verschiedener Höhe ($h = 20$ und 40 mm). Bei dieser Versuchsreihe sollte eine Nachprüfung der an ebenen Rippen gewonnenen Beziehungen für die Kreisrippe stattfinden.

Der Gang der Versuche war so, daß, nachdem die betreffende Platte dicht und bündig im Asbestschieferdeckel eingegipst war, bei ruhender Luft angeheizt und so lange reguliert wurde, bis die Temperaturen im inneren und äußeren Kasten einander gleich (150°) waren. Dieser Beharrungszustand wurde nach 2 bis 3 Tagen erreicht. Die einzelnen Punkte einer Versuchsreihe bei verschiedenen Luftgeschwin-

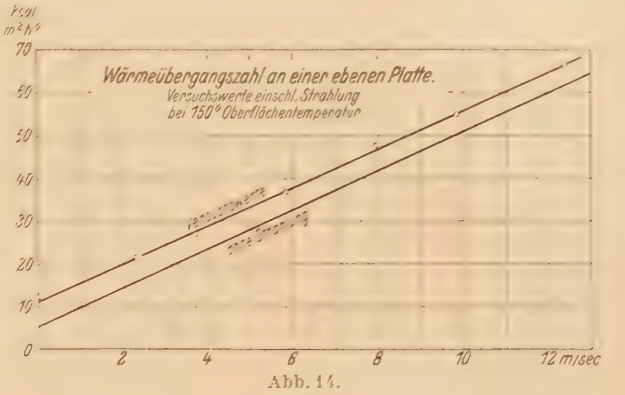


Abb. 14.

digkeiten konnten dann in Zwischenräumen von 2 bis 3 Stunden, in denen zu Anfang der Motor auf die gewünschte Umdrehungszahl eingestellt und die Heizung fortlaufend bis zur Beharrung reguliert wurde, erledigt werden (Zahlentafel 4).

Versuchsreihe I.

Wärmeübergang an einer ebenen, wagerecht liegenden Platte von 204 × 204 mm²; Oberfläche: unbearbeitetes Gußeisen.

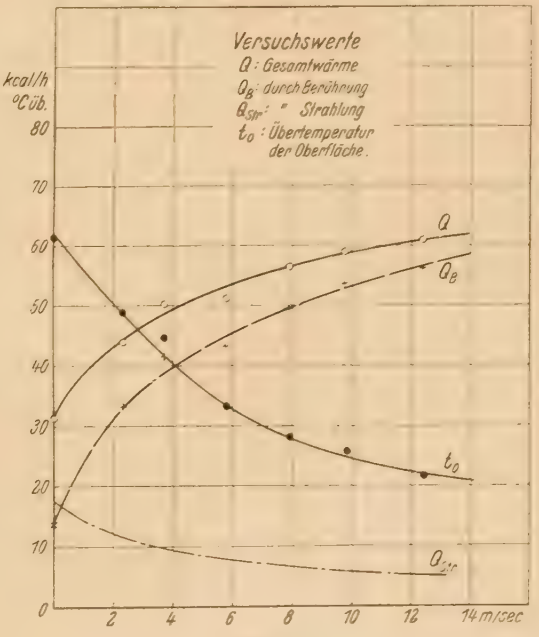


Abb. 15.

Die Oberflächentemperatur wurde an vier Punkten der Außenfläche mit eingebetteten Thermoelementen gemessen, deren Angaben nur wenig voneinander abwichen.

Die Meßwerte sind in Zahlentafel 5 und Abb. 14 und 15 gegeben. Die Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten von der Luftgeschwindigkeit kann in dem Versuchsbereich durch eine lineare Gleichung wiedergegeben werden, in der Form

$$x = 11{,}2 + 4{,}43 \cdot v \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ$$

In diesem Wert ist die Strahlung mit enthalten; da zur Benutzung des Koeffizienten der Wärmeübergang durch Berührung allein gegeben sein muß, sei die Strahlung gesondert berechnet. Auf Grund des Gesetzes von Stephan-Boltzmann ergibt sich

$$Q_{Str} = C \cdot F \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Nach Gröber ist für Holz $C_1 = 4{,}44$,
Gußeisen $C_2 = 4{,}39$,
abs. Schwarz $C_0 = 4{,}9$.

Damit wird $C = 4{,}02$. Die Oberfläche ist $F = 0{,}0416$. Die Außentemperatur im Mittel $t_2 = 26{,}6^0$. Damit wird

$$Q_{Str} = 4{,}02 \cdot 0{,}0416 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - 2{,}996^4 \right].$$

Die Zahlentafel 5 gibt die so erhaltenen Werte. Durch Abzug der Strahlungswärme von der gemessenen Wärme-

Tab. No. 5

Versuchswerte Versuch I den

Platte

Versuch Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum	1927	3.5	24.5	13.5	17.5	18.5	23.5	24.5
Stromstärke	Amp	2,21	2,60	2,78	2,81	2,95	3,00	3,06
Spannung	Volt	16,5	19,7	21,0	21,2	22,2	22,8	23,1
Heizleistung	Watt	36,5	51,2	58,4	59,5	65,5	68,4	70,7
" "	kcal/h	31,3	44,0	50,2	51,2	56,3	58,8	60,8
Stromstärke außen	Amp	2,50	2,60	2,65	2,62	2,62	2,62	2,70
" innen	"	1,78	1,70	1,85	1,80	1,82	1,85	1,70
Temperatur innen	°C	150,5	150,2	150,0	149,8	150,5	150,2	149,9
" außen	"	34,9	24,8	27,4	29,6	29,0	28,1	28,1
" der Oberfläche	"	96,2	93,8	66,0	63,0	57,3	53,8	50,0
" innen	"	154,5	155,4	156,8	156,1	157,5	154,1	156,3
" " außen	"	154,5	155,8	157,0	156,5	157,5	157,5	156,7
" im Kanal	"	149,7	150,5	150,2	150,1	157,0	150,8	150,3
" " Raum	"	25,5	23,5	19,8	27,5	26,3	24,9	23,5
Temp.-Differenz innen	"	54,3	46,4	84,0	86,8	93,2	96,4	99,0
" " außen	"	61,3	49,0	44,6	33,4	28,4	25,4	27,9
" " insgesamt	"	115,6	125,4	128,6	120,2	121,6	122,1	121,8
Umdr. des Ventilators	U/min	0	880	1415	2200	3000	3400	4400
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	2,3	3,7	5,8	7,95	9,8	12,4
α_1 (Wärme innen)	kcal/m²h°	14,4	14,4	14,95	14,72	15,1	15,36	15,38
α_2 (" außen)	"	12,25	21,6	27,1	36,8	47,6	55,0	66,7
K (W/8 K)	"	6,63	8,59	9,58	10,4	11,36	11,78	12,22
		Abzug der Strahlung						
abs. Temp. der Oberfläche T_1	°abs	364,2	346,8	339,0	336,0	330,3	326,8	323,0
$(T_{100})^4$		186,0	144,5	132,3	128,0	120,0	113,6	107,0
$(T_{100})^4$		80,2	80,2	80,2	80,2	80,2	80,2	80,2
Differenz		105,8	64,3	52,3	47,8	39,8	33,4	26,8
Heizleistung gesamt	kcal/h	31,3	44,0	50,2	51,2	56,3	58,8	60,8
Wärmeabg. Luft/Oberfl.	"	17,4	10,80	8,8	8,0	6,4	5,6	4,8
" " Berührung	"	13,6	33,2	41,4	43,2	49,6	53,2	56,0
α W.-A. (Berührung)	kcal/m²h°	5,33	16,29	22,3	31,1	42,1	49,7	61,3
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	2	4	6	8	10	12
α W.-A.	kcal/m²h°	5,3	14,4	23,5	32,6	41,7	50,8	59,9

Zahlentafel 5.

abgabe erhält man die Berührungswärme, durch Division mit der Fläche und der äußeren Temperaturdifferenz die WÜZ für Berührung allein. Für diese ergibt sich die Beziehung

$$\alpha_0 = 5{,}3 + 4{,}55 \cdot v \ \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2\text{h}^0}.$$

Über den Wärmeübergang an einer ebenen Platte liegen Versuche vor mit folgenden Ergebnissen:

Nach Jürges ist für $v = 0$ bis 5 m/s

$$\alpha = 5{,}3 + 3{,}6 \cdot v^*),$$

der Wert für $v = 0$ ist derselbe, während die Neigung eine andere ist.

Nach Ott ist $\alpha = 18{,}6 + 4{,}65 \cdot v$

*) *Berücksichtigt man, daß die Geschwindigkeit in 30 mm Höhe (siehe Tab. 2) etwa um 25% über der mittleren liegt, so ergibt sich* $\alpha = 5{,}3 + \frac{1{,}55}{1{,}25} \cdot v = 5{,}3 + 3{,}64 \cdot v$ *wie bei Jürges.*

(einschließlich der Strahlung bei 60°). Hier ist die Neigung dieselbe, während hinsichtlich des Wertes für $v = 0$ ein größerer Unterschied besteht. Dabei ist zu beachten, daß die Werte von Ott in einer ähnlichen Versuchseinrichtung ermittelt sind (Kanal), während Jürges einen freien Luftstrom an einer senkrechten Platte benutzt. Die Übereinstimmung der Neigung bei den vorliegenden Werten mit denen von Ott (4,55 bzw. 4,65 × v) dürfte darin ihren Grund haben. Der Ausgangswert ist von Ott jedenfalls zu hoch ermittelt. Einzelwerte liegen noch vor von Recknagel mit

$\alpha = 20$ kcal/m²h° für $v = 1$ m/s,
$\alpha = 30$ » » $v = 4{,}5$ »
$\alpha = 36$ » » $v = 5{,}5$ »

nach Nusselt

$\alpha = 25$ » » $v = 3$ »

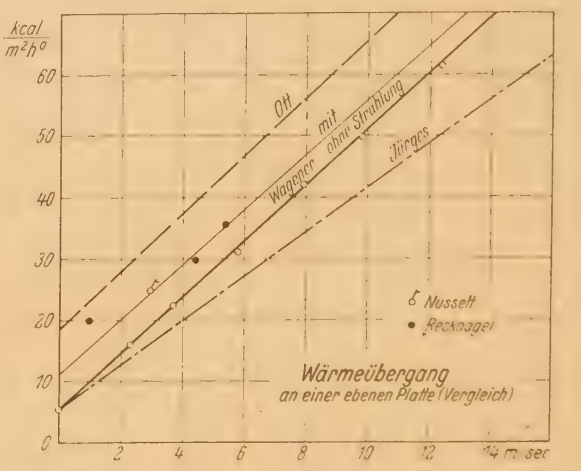


Abb. 16.

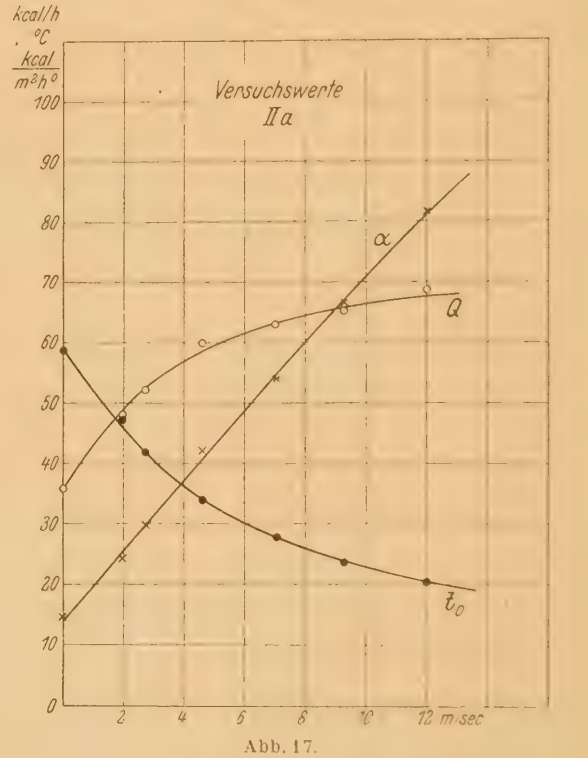


Abb. 17.

Die Abb. 16 zeigt, daß die Werte aus Versuchsreihe I in der Mitte zwischen den bisherigen Versuchswerten liegen und daß die Einzelwerte gute Übereinstimmung ergeben, es soll daher weiteren Betrachtungen die Beziehung

$$\alpha_0 = 5{,}3 + 4{,}55 \cdot v \text{ kcal/m}^2\text{h}^0$$

zugrunde gelegt werden, gültig für eine unbearbeitete Oberfläche aus Gußeisen für die Berührungswärme allein bei einer Innentemperatur von 150°, einer Außentemperatur von 25° und einer Luftgeschwindigkeit von 0 bis 12 m/s.

Die Wärmeübergangszahl innen wird nur zur Kontrolle errechnet. Eigentlich müßten die sich ergebenden Werte für alle Versuchsreihen gleich sein. Daß dies nicht der Fall ist, liegt darin, daß die Oberflächenbeschaffenheit der unteren Plattenseite nicht immer dieselbe ist; ursprünglich bearbeitet zeigte sich, besonders nach längerer Unterbrechung und Wiederinbetriebnahme, ein starker Rostansatz, der durch Vergrößerung der Strahlungszahl gegenüber der blanken Fläche den Wärmeübergang innen erhöhte. Die Zahlen schwanken daher zwischen 11 bis 15 kcal/m²h°. Die Beziehung von Nusselt für ruhende Luft an wagerechter Platte

$$\alpha = 2{,}8 \sqrt[4]{\tau}\ \text{kcal/m}^2\text{h}^0,$$

worin τ die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Platte ist, läßt sich wegen der verwickelten Strahlung in dem beheizten Raum nicht nachprüfen.

Versuchsreihe II.

Freistehende Rippen.

Um die theoretischen Beziehungen nachzuprüfen, werden Versuche an einzelnen, freistehenden Rippen vorgenommen. Unter denselben Bedingungen wie in Versuchsreihe I werden

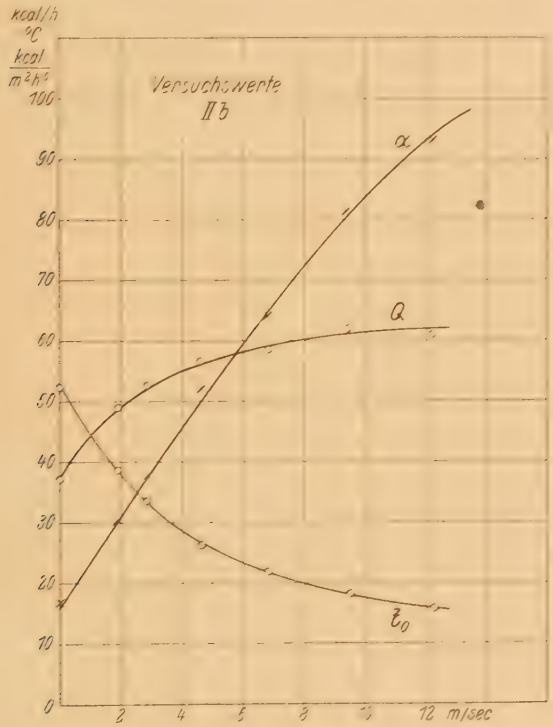


Abb. 19.

Platten mit einer, zwei und drei Rippen in der Mitte (Abstand voneinander 15 mm, Höhe 50 mm) untersucht. Gemessen werden Oberflächentemperatur, Temperaturverlauf in der Rippe und Gesamtwärmeabgabe bei konstanter Innentemperatur (150°) und verschiedenen Luftgeschwindigkeiten. Die Versuchswerte sind in Zahlentafel 6 bis 8 und Abb. 17 bis 21 gegeben, der Temperaturverlauf in der Rippe in Abb. 22. Besonders interessiert das Verhältnis t_s zu t_a. In Zahlentafel 9 sind aus den Temperaturkurven die Übertemperaturen am Fuß und an der Spitze der Rippe extrapoliert; dabei ist als Lufttemperatur für die Spitze die Temperatur der Luft vor der Platte, für den Fuß die Mitteltemperatur aus den 6 Messungen vor, über und hinter der Platte eingesetzt. Die Darstellung der Werte $\varepsilon = t_s$ zu t_a gibt Abb. 21. Zum Vergleich ist das theoretische Verhältnis nach Formel 11

$$\varepsilon_{th} = \frac{t_s}{t_a} = \frac{1}{\mathfrak{Cof}\, mh}$$

berechnet. Hierin ist

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda\delta}}.$$

$$\alpha = 5{,}3 + 4{,}55 \cdot v\ \text{kcal/m}^2\text{h}^0,$$
$$\lambda = 50\ \text{kcal/m h}^0 \text{ für Eisen},$$
$$\delta = 0{,}004\ \text{m},\quad h = 0{,}05\ \text{m},$$

die Kurve ist in Abb. 21 gestrichtelt eingezeichnet. Die Abweichungen erklären sich einmal aus dem Wert α, der die

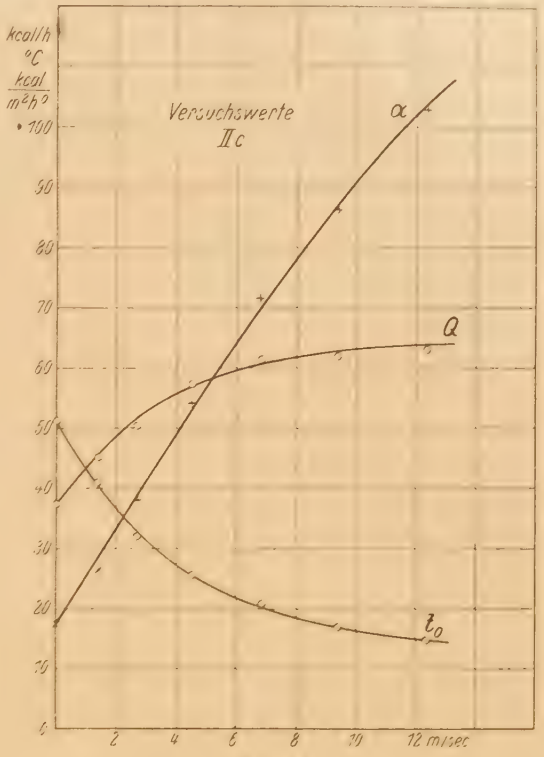


Abb. 19.

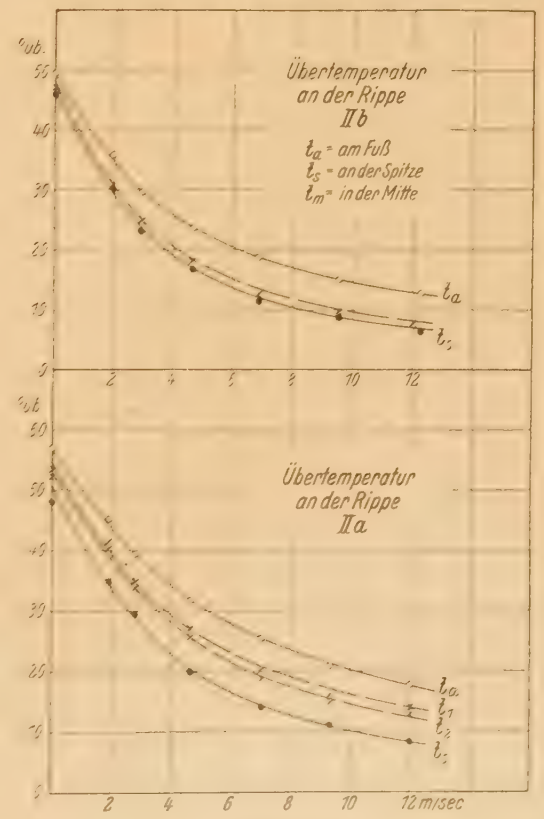


Abb. 20.

Strahlung nicht berücksichtigt, zweitens aus der Schwierigkeit, die Übertemperatur im einzelnen zu bestimmen. Die obenerwähnte Einsetzung von Mittelwerten für die Luft

Tab No. 6

Versuchswerte Versuch II a den

1 Rippe

Versuch Nr.	Nr	1	2	3	4	5	6	7
Datum	1928	25.7.	25.7.	25.7.	25.7.	25.7.	26.7.	26.7.
Stromstärke	Amp	2,34	2,70	2,82	3,02	3,08	3,15	3,2[illegible]
Spannung	Volt	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Heizleistung	Watt	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
" "	Kcal/h	36,0	48,2	52,2	59,9	63,0	65,3	66,8
Stromstärke aussen	Amp	2,48	2,55	2,50	2,52	2,52	2,53	2,57
" innen	"	1,72	1,72	1,72	1,80	1,85	2,0	1,98
Temperatur innen	°C	150,0	150,0	149,9	150,2	150,2	150,4	150,3
" aussen	"	33,0	27,7	27,6	27,5	27,6	28,6	30,4
" der Rippe [illegible]	"	[illegible]	75,7	67,0	[illegible]	55,0	52,[illegible]	[illegible]
" unten innen	"	157,8	159,0	159,4	160,8	161,2	161,8	162,6
" " aussen	"	159,0	159,1	158,8	159,4	161,2	161,4	162,5
" [illegible]	"	149,8	149,5	149,8	149,2	149,2	149,0	149,[illegible]
" [illegible]	"	[illegible]	25,2	25,7	25,1	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Differenz im ganzen	"	117,6	122,3	122,3	122,7	122,[illegible]	122,8	11[illegible]
" innen	"	56,0	72,3	77,7	86,1	92,2	95,6	97,1
" aussen	"	58,0	43,7	42,0	34,1	28,0	23,6	20,2
Umdreh. d. Ventilators	U/min	0	734	1042	1750	2660	3520	4536
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,9	2,72	4,6	7,02	9,3	12,0
α	Kcal/m²h	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
α [illegible]		[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
λ	"	[illegible]	9,00	10,45	11,40	12,08	13,13	14,[illegible]
Temp. am Rippenfuss	°C	89,8	73,0	67,0	59,2	53,2	49,6	48,0
" in 15 m/m Höhe	"	86,2	69,1	62,9	54,6	47,5	45,0	43,5
" " 28 " "	"	84,0	66,6	60,2	51,3	47,5	41,6	41,2
" an der Spitze	"	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Temp. der Luft [illegible]	"	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]

Zahlentafel 6.

Tab No. 7

Versuchswerte Versuch II b den

2 Rippen

Versuch Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum	1928	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5
Stromstärke	Amp	2,3[illegible]	2,5[illegible]	2,8[illegible]	2,92	2,96	3,05	3,03
Spannung	Volt	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Heizleistung	Watt	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
" "	Kcal/h	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Stromstärke aussen	Amp	[illegible]	[illegible]	2,43	2,4[illegible]	2,5[illegible]	2,50	2,50
" innen	"	[illegible]	[illegible]	1,72	1,75	1,85	1,90	1,88
Temperatur innen	°C	[illegible]	[illegible]	[illegible]	150,4	150,4	150,0	150,4
" aussen	"	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	31,5	[illegible]	[illegible]
" "	"	36,0	31,3	30,2	30,2	31,0	32,5	34,5
Oberflächen Temp.	"	88,5	69,8	64,9	57,2	53,5	51,4	50,6
Temp. unten innen	"	[illegible]	159,8	160,0	160,8	161,5	161,2	161,4
" " aussen	"	[illegible]	158,8	158,5	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
" im Kanal	"	[illegible]	[illegible]	[illegible]	150,0	150,7	149,6	149,6
" " Raum	"	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	28,6	29,5	29,8
Temp. Differenz innen	"	[illegible]	80,3	85,5	93,2	96,9	98,6	99,8
" im ganzen	"	[illegible]	119,1	118,9	119,4	118,[illegible]	116,9	115,5
" " aussen	"	[illegible]	37,8	33,[illegible]	26,2	[illegible]	18,3	15,[illegible]
Umdreh. d. Ventilators	U/min	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	250[illegible]	3[illegible]	40[illegible]
Luftgeschwindigkeit	m/sec	[illegible]	[illegible]	2,85	4,6	6,82	9,5	12,25
α	Kcal/m²h	14,[illegible]	15,2[illegible]	15,3[illegible]	15,22	15,[illegible]	15,[illegible]	15,[illegible]
α [illegible]	"	[illegible]	30,42	37,8	52,[illegible]	67,0	81,2	93,1
λ	"	7,94	10,10	10,82	11,60	12,06	12,96	12,89
Temp. am Rippenfuss	°C	85,6	66,8	61,1	54,8	50,2	48,2	47,6
" in " Mitte	"	[illegible]	[illegible]	55,1	48,3	43,5	42,0	42,0
" an der Spitze	"	82,2	59,5	53,6	47,4	42,4	41,2	40,8

Zahlentafel 7.

Tab No. 8

Versuchswerte Versuch II c den

3 Rippen

Versuch Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum	1928	30.7.	30.7.	30.7.	30.7.	30.7.	30.7.	30.7.
Stromstärke	Amp	2,39	2,62	2,82	2,93	3,04	3,05	3,07
Spannung	Volt	18,2	20,1	21,9	22,7	23,5	23,6	23,9
Heizleistung	Watt	43,5	52,6	58,9	66,6	71,5	72,0	73,4
" "	Kcal/h	37,4	45,2	50,6	57,3	61,5	61,9	63,1
Stromstärke aussen	Amp	2,51	2,46	2,50	2,50	2,52	2,52	2,52
" innen	"	1,70	1,80	1,85	1,85	1,90	1,85	1,90
Temperatur innen	°C	150,0	150,4	150,0	150,0	150,1	150,3	150,2
" aussen	"	33,8	29,5	29,5	29,1	29,5	30,1	31,5
" "	"	32,1	27,0	27,9	28,0	28,6	29,6	31,0
" an Oberfläche	"	85,2	[illegible]	61,5	54,6	50,2	47,3	46,2
" unten innen	"	157,8	157,5	159,7	160,4	161,3	161,9	161,8
" " aussen	"	157,0	157,8	159,8	161,3	161,9	162,3	162,2
" im Kanal	"	150,5	150,8	150,1	150,1	149,9	150,7	150,0
" " Raum	"	25,8	[illegible]	26,5	26,5	26,4	26,0	25,6
Temp. Differenz innen	"	[illegible]	[illegible]	88,5	95,4	99,9	103,0	104,0
" " aussen	"	51,[illegible]	[illegible]	32,[illegible]	25,5	20,7	17,2	14,7
" " im ganzen	"	116,2	120,9	120,5	120,9	120,6	120,2	118,7
Umdr. des Ventilators	U/min	0	506	1032	1704	2580	3566	4652
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,32	2,70	4,5	6,8	9,4	12,3
α	Kcal/m²h	[illegible]	[illegible]	14,32	15,06	15,38	15,02	15,18
α [illegible]	"	[illegible]	[illegible]	38,[illegible]	54,55	71,5	86,6	103,2
λ	"	7,88	9,17	10,29	11,62	12,48	12,60	13,02
Temp. am Rippenfuss	°C	82,2	66,8	57,2	49,6	45,3	42,6	41,6
" Mitte Rippe	"	79,0	63,2	53,5	45,9	41,3	39,4	37,6
" an der Spitze 1	"	77,4	59,4	49,3	41,5	37,6	35,5	35,2
" " " " 2	"	78,1	59,3	49,2	41,2	37,5	35,2	34,6
" " " " 3	"	78,0	59,5	49,5	42,2	38,4	35,7	35,6
" " " " Mittel	"	77,8	59,4	49,3	41,6	37,8	35,5	35,1

Zahlentafel 8.

Tab. No. 9

Verhältnis von ts : ta den

ts - Temp. an der Rippenspitze

ta - " am Rippenfuss

II a 1 Rippe Versuchswerte								
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,9	2,72	4,6	7,02	9,3	12,0
Temperatur am Fuss	°C	89,8	73,0	67,0	59,2	53,2	49,6	48,0
" an der Spitze	"	80,0	60,8	55,0	45,5	39,8	37,5	36,7
Umgeb. Temperatur	"	33,0	27,7	27,6	27,5	27,6	28,6	30,4
" "	"	32,0	25,7	25,7	25,4	25,5	26,6	28,3
Übertemp. am Fuss ta	"	56,8	45,3	39,4	31,7	25,6	21,0	17,6
" an der Spitze ts	"	48,0	35,1	29,3	20,1	14,3	10,9	8,4
II b 2 Rippen								
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,9	2,85	4,6	6,82	9,5	12,25
Temperatur am Fuss	°C	85,6	66,8	61,1	54,8	50,2	48,2	47,6
" an der Spitze	"	82,2	59,5	53,6	47,4	42,4	41,2	40,8
Umgebung Temp.	"	36,0	31,0	31,5	31,0	31,5	33,1	34,9
" "	"	36,0	29,3	30,2	30,2	31,0	32,5	34,5
Übertemp. am Fuss ta	"	49,6	35,8	29,6	23,8	18,7	15,1	12,7
" an der Spitze ts	"	46,2	30,2	23,4	17,2	11,4	8,7	6,3
II c 3 Rippen								
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,32	2,70	4,5	6,8	9,4	12,3
Temperatur am Fuss	°C	82,2	66,8	57,2	49,6	45,3	42,6	41,6
" an der Spitze	"	78,0	59,5	49,5	42,2	38,4	35,7	35,6
Umgebungs-Temp.	"	33,8	29,5	29,5	29,1	29,5	30,1	31,5
"		32,1	27,0	27,9	28,0	28,0	29,0	31,0
Übertemp. am Fuss		48,4	37,3	27,7	20,5	15,8	12,5	10,1
" an der Spitze		45,9	32,5	21,6	14,2	9,8	6,1	4,6
		Extrapolierte Werte						
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	2	4	6	8	10	12
1 Rippe	ta 1 °C üb.	57,0	43,4	34,0	28,1	23,6	20,4	17,6
	ts 1	50,5	33,7	22,9	16,8	12,8	10,2	8,4
2 Rippen	ta 2	49,6	35,0	25,7	20,5	17,1	14,7	12,9
	ts 2	46,8	29,2	19,0	13,6	10,3	8,3	7,2
3 Rippen	ta 3	48,7	32,[illegible]	22,0	17,3	14,2	12,1	10,5
	ts 3	45,7	26,4	15,9	10,7	7,6	5,9	5,[illegible]
Verhältnis ts : ta	ε 1	0,886	0,776	0,674	0,598	0,543	0,500	0,478
	ε 2	0,944	0,834	0,739	0,664	0,602	0,565	0,558
	ε 3	0,938	0,815	0,704	0,619	0,535	0,488	0,486
[illegible]	[illegible]	0,933	0,844	0,754	0,697	0,638	0,587	0,5[illegible]
[illegible]	[illegible]	0,9[illegible]	–	0,700	–	0,622	–	0,52[illegible]

Zahlentafel 9.

temperatur bedeutet eine Vereinfachung, die versuchstechnisch schwer zu umgehen ist; wie die Abb. 21 zeigt, ist die Abweichung jedoch so gering, besonders auch bei Versuch 2b

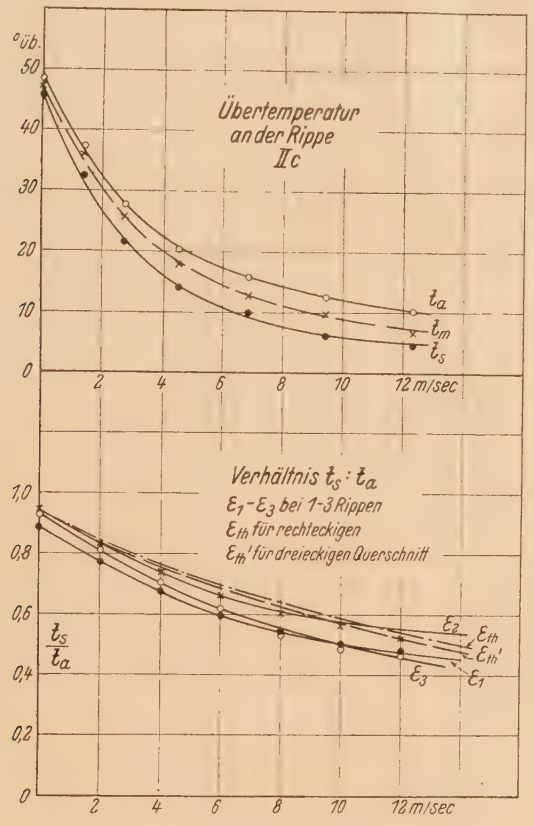


Abb. 21.

und 2c, wo der Einfluß der Strahlung durch die geringeren Temperaturen der Rippen vermindert ist, daß die Übereinstimmung als hinreichend angesehen werden kann. Um

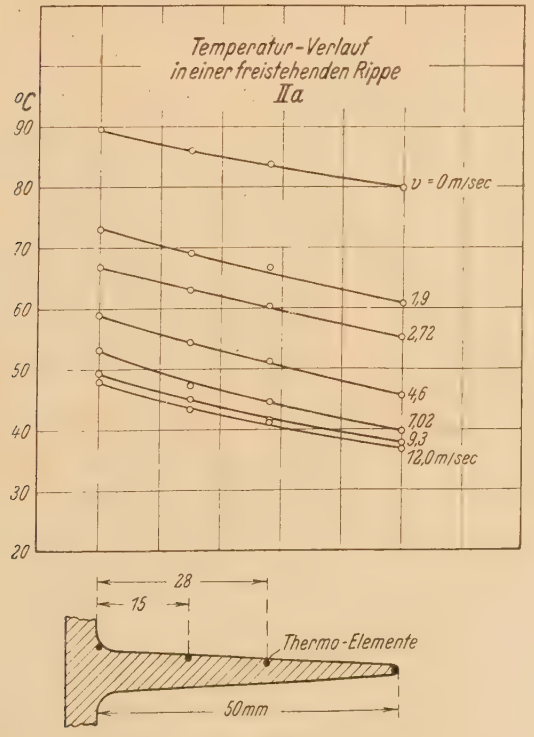


Abb. 22.

zu zeigen, daß die Verwendung der Formel 11, die für rechteckigen Querschnitt gilt, keine unzulässige Vereinfachung bedeutet, ist das Verhältnis t_s zu t_a für dreieckigen Querschnitt nach Schmidt ε_{th}' mit eingezeichnet. Danach ist die Verwendung der einfacheren Beziehung für rechteckigen

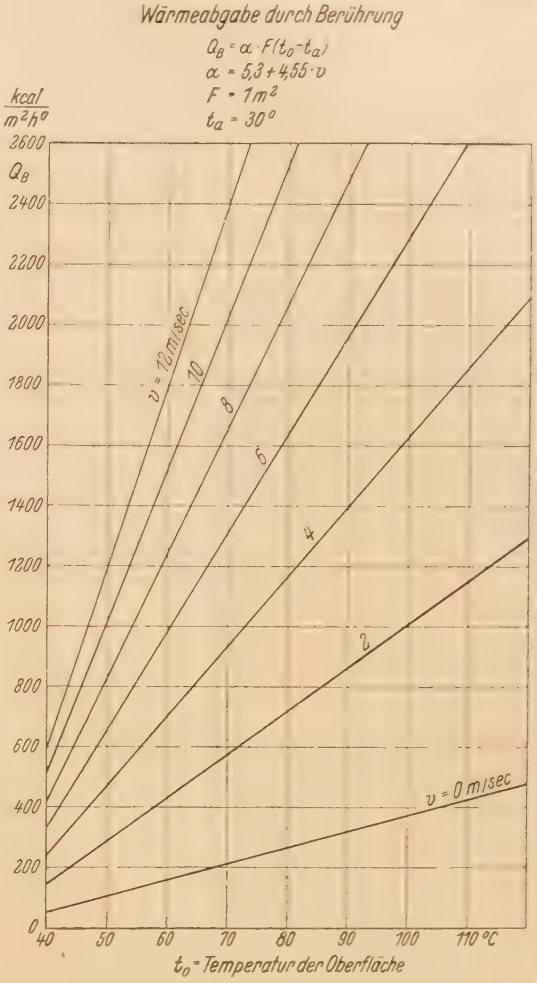


Abb. 23.

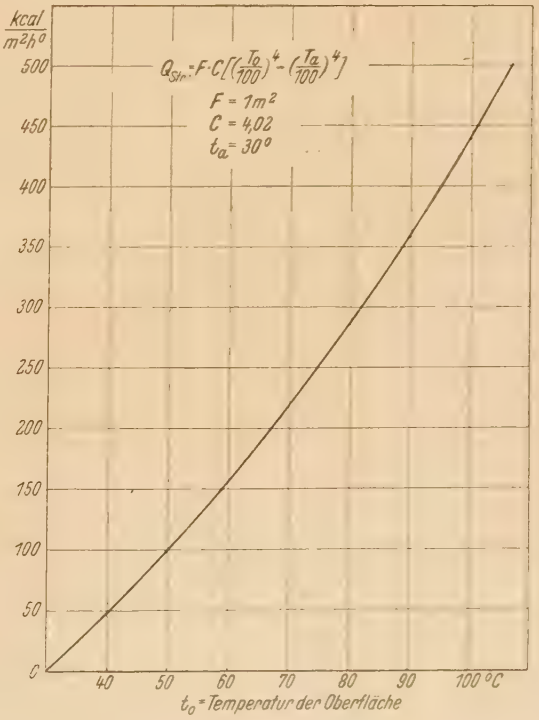


Abb. 24.

Querschnitt bei den in Frage kommenden Abmessungen zulässig.

Die Wärmeabgabe der Rippe läßt sich aus den Versuchen auf folgende Weise ermitteln:

Von der Gesamtwärmeabgabe (Q) wird die Wärmeabgabe der Platte abgezogen; diese wird auf Grund der gemessenen Oberflächentemperatur gesondert für Berührung und Strahlung ermittelt. Zur Vereinfachung der Rechnung ist für verschiedene Temperaturdifferenzen und verschiedene Luftgeschwindigkeiten der Wert

$$Q_B = \alpha \cdot \Delta t \ \text{kcal/m}^2\text{h}$$

für $F = 1 \ \text{m}^2$ mit

$$\alpha = 5{,}3 + 4{,}55 \cdot v$$

berechnet, ebenso Q_{st} für verschiedene Temperaturdifferenzen und $F = 1 \ \text{m}^2$. Es werden dann nur für die gemessene

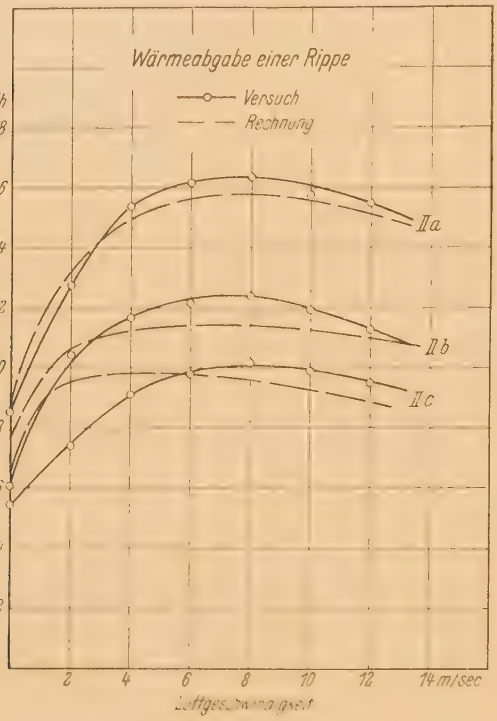


Abb. 25.

Temperaturdifferenz Q_B und Q_{st} der Darstellung in Abb. 23 und 24 entnommen und mit der Fläche (Platte vermindert um Rippenquerschnitt) multipliziert. Die Summe $Q_B + Q_{st}$ wird von der gemessenen Gesamtwärmeabgabe abgezogen und ergibt die Wärmeabgabe der Rippe Q_R. Bei Versuch 2b und 2c muß dieser Wert noch durch 2 bzw. 3 geteilt werden. Zum Vergleich wird die Wärmeabgabe der Rippe berechnet. Nach Formel 12 ist die Wärmeabgabe durch Berührung

$$Q = t_a \cdot l \cdot \sqrt{2\,\alpha\,\lambda\,\delta} \cdot \mathfrak{Tang}\, m \cdot h \ \text{kcal/h},$$

worin

$$l = 0{,}2 \ \text{m}; \quad \delta = 0{,}004 \ \text{m}; \quad h = 0{,}05 \ \text{m},$$

$$\alpha = 5{,}3 + 4{,}55 \cdot v; \quad \lambda = 50 \ \text{kcal/m h}^0,$$

$$m = \sqrt{\frac{2\,\alpha}{\lambda\,\delta}},$$

t_a = Übertemperatur am Fuß der Rippe. Dazu kommt noch die Strahlungswärme. Bei der Berechnung dieser Größe wird die Rippenflanke der Einzelrippe mit der Hälfte der Strahlung einer freiliegenden Fläche eingesetzt, weil ja die Platte, auf der die Rippe sitzt, die Hälfte der Strahlungskugel unwirksam macht. Bei Versuch 2b und 2c werden nur die außenliegenden Rippenseiten berücksichtigt. Die Zusammenstellung der so ermittelten Werte zeigt Zahlentafel 10 und 11. Die graphische Darstellung in Abb. 25 ergibt eine gute Übereinstimmung bei Versuch 2a, während bei Versuch 2b und 2c bei geringen Luftgeschwindigkeiten größere Abweichungen auftreten. Diese Abweichungen sind durch die Unsicherheit in der Messung der »Übertemperatur«

Tab. No. 10

Wärmeabgabe einer Rippe

Vergleich zwischen Versuch und Rechnung

Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	2	4	6	8	10	12
IIa: 1 Rippe								
Gesamtwärme Q	kcal/h	36,0	49,3	57,2	61,7	64,5	66,4	67,6
Übertemp. der Oberfl.	°üb	59,0	45,7	36,3	30,0	25,7	22,7	20,3
Platte: Q_B	kcal/h	13,4	26,4	34,0	39,2	42,8	46,0	48,0
Q_{str}	"	14,1	10,2	7,8	6,3	5,3	4,6	4,1
Q Platte $= Q_B + Q_{str}$	"	27,5	36,6	41,8	45,5	48,1	50,6	52,1
$Q_R = Q - Q$ Platte	"	8,5	12,7	15,4	16,2	16,4	15,8	15,5
Übertemp. am Fuss	°üb	57,0	43,4	34,0	28,1	23,6	20,4	17,6
mittlere Übert. d. Rippe	"	53,0	37,8	26,8	21,5	17,5	14,5	12,3
Q_R'	kcal/h	5,76	11,2	13,5	14,6	14,9	14,9	14,5
$Q_{R\,str}$	"	3,07	2,05	1,39	1,08	0,86	0,79	0,6
$Q_{R\,th} = Q_R' + Q_{R\,str}$	"	8,83	13,25	14,89	15,68	15,76	15,6	15,1
Berechnung von Q_R'								
$h = 0{,}05$; $l = 0{,}2$; $\delta = 0{,}004$ m, $\lambda = 50$ kcal/m h°								
$Q = t_a \cdot l \cdot \sqrt{2\alpha\lambda\delta}\ \mathfrak{Tang}\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda\delta}}\ h$								
$= t_a \cdot (l\sqrt{2\lambda\delta}) \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \mathfrak{Tang}\, h\sqrt{\frac{2}{\lambda\delta}} \cdot \sqrt{\alpha}$								
$= t_a \cdot 0{,}1266\,\sqrt{\alpha} \cdot \mathfrak{Tang}\, 0{,}158 \cdot \sqrt{\alpha} = t_a \cdot (\text{konst})\, v$								
Luftgeschwind. v	m/sec	0	2	4	6	8	10	12
W Ü Z $\alpha = 5{,}3 + 4{,}55\,v$	kcal/m² h°	5,3	[illegible]	23,5	32,5	41,7	59,8	[illegible]
$\sqrt{\alpha}$	–	2,30	3,80	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
$0{,}1266\,\sqrt{\alpha}$	–	0,291	0,481	0,614	0,722	[illegible]	[illegible]	[illegible]
$0{,}158\,\sqrt{\alpha}$	–	0,363	0,600	0,766	0,902	1,020	[illegible]	[illegible]
$\mathfrak{Tang}\,(0{,}158 \cdot \sqrt{\alpha})$	–	0,348	0,537	0,645	0,717	0,770	0,810	[illegible]
(konst) v	–	0,101	0,258	0,396	0,518	0,630	0,731	0,823
$Q_{R\,str}$ aus Abb. 24 mit $F_R = 0{,}02$ m²								
Für die Platte ist bei Vers.		IIa: $F = 0{,}04$ m²						
		IIb: $= 0{,}0384$ "						
(Gesamtquerschnitt		IIc: $= 0{,}0368$ "						
vermindert um n Rippenquerschnitt, n = Rippenzahl								

Zahlentafel 10.

Tab. No. 11

Wärmeabgabe einer Rippe

Vergleich zwischen Versuch und Rechnung

Luftgeschw.	m/sec	0	2	4	6	8	10	12
IIb: 2 Rippen								
Gesamtwärme Q	kcal/h	34,5	49,3	54,8	58,2	60,2	61,3	61,8
Üb.-Temp. der Oberfl.	°üb	52,5	37,6	28,6	23,3	19,8	17,5	15,8
Platte: Q_B	kcal/h	10,7	20,7	25,7	29,3	31,5	34,2	36,2
Q_{str}	"	11,7	7,8	5,7	4,0	3,8	3,3	3,0
Q Platte $= Q_B + Q_{str}$	"	22,4	28,5	31,4	33,9	35,3	37,5	39,2
$2\,Q_R = Q - Q$ Platte	"	12,1	20,8	23,4	24,3	24,9	23,8	22,6
Q_R		6,05	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Übertemp. am Fuss	°üb	49,6	35,0	25,7	20,5	17,1	14,7	12,9
mittl. Übertemp. d. Rippe	"	47,8	31,3	22,0	16,0	12,8	10,5	8,8
Q_R'	kcal/h	5,01	8,03	10,2	10,6	10,8	10,7	10,6
$Q_{R\,str}$	"	2,70	1,65	1,11	0,78	0,61	0,5	0,43
$Q_{R\,th} = Q_R' + Q_{R\,str}$	"	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
IIc: 3 Rippen								
Gesamtwärme Q	kcal/h	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Übertemp. der Oberfl.	°üb	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Platte: Q_B	kcal/h	10,0	19,2	23,3	26,3	28,0	30,7	32,6
Q_{str}	"	10,9	7,2	5,1	4,0	3,4	2,8	2,5
Q Platte $= Q_B + Q_{str}$	"	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
$3\,Q_R = Q - Q$ Platte	"	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Q_R	"	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
Übert. am Fuss	°üb	58,7	32,4	22,6	17,3	14,2	12,9	10,5
mittl. Übertemp. d. Rippe	"	46,5	28,0	18,0	13,8	10,2	8,5	7,2
Q_R'	kcal/h	4,62	8,36	8,84	8,66	8,66	8,84	8,64
$Q_{R\,str}$	"	2,61	1,51	0,84	0,67	0,48	0,40	0,34
$Q_{R\,th} = Q_R' + Q_{R\,str}$	"	7,53	9,87	9,88	9,63	9,42	9,24	8,98

Zahlentafel 11.

begründet. Während bei einer freistehenden Rippe die Übertemperatur am Fuß durch die Differenz von Temperatur am Fuß und mittlerer Lufttemperatur genau definiert ist, ist dieser Ansatz bei mehreren Rippen besonders bei niederer Luftgeschwindigkeit nicht mehr einwandfrei. Hier liegen zwischen den Rippen »Temperaturnester«, die erst bei höheren Luftgeschwindigkeiten herausgeblasen werden. Die wirkliche Übertemperatur wird demnach bei mehreren Rippen und geringer Luftgeschwindigkeit niedriger sein, als sie durch den obigen Ansatz errechnet wird. In dieser Unsicher-

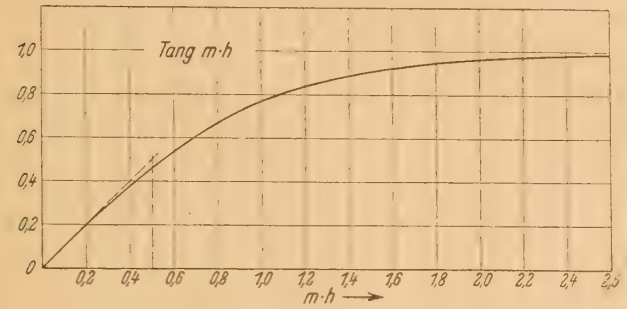


Abb. 26.

heit liegt die Schwierigkeit der Anwendung der Formeln, in denen der Begriff Übertemperatur vorkommt. Dieser Schwierigkeit soll dadurch begegnet werden, daß in den weiteren Versuchen nicht mehr die einzelne Rippe, sondern die WÜZ bezogen auf die Grundfläche unter Einsetzung der Differenz von Oberflächen- und mittlerer Lufttemperatur betrachtet werden soll. Bezeichnet Q_R die Wärmeabgabe

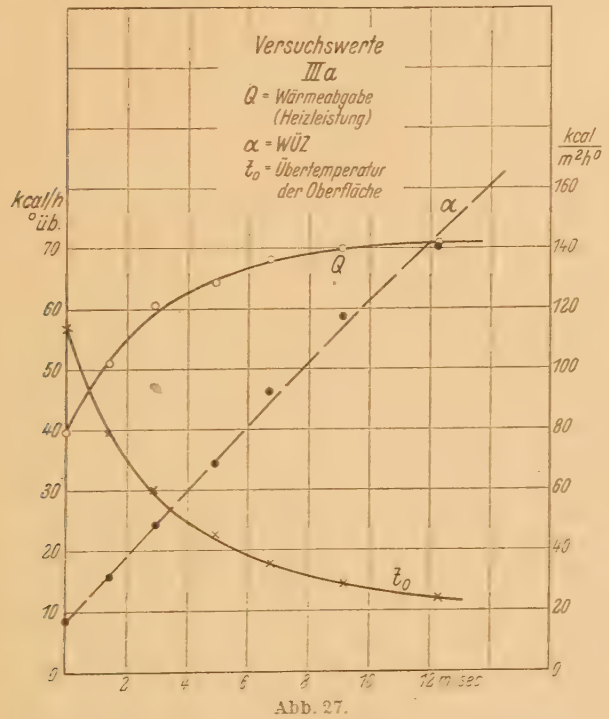


Abb. 27.

einer Rippe, so wird die Wärmeabgabe einer Fläche F mit n Rippen in erster Annäherung $n \cdot Q_R$ sein. Für Q_R gilt

$$Q_R = t_0 \cdot l \cdot \sqrt{2\,\alpha_0\,\lambda\,\delta} \cdot \mathfrak{T}\mathrm{ang}\, m h$$

Die WÜZ einer Fläche F mit einer Wärmeabgabe Q bei einer Temperaturdifferenz t_0 ist

$$\alpha = \frac{Q}{F \cdot t_0}.$$

Ist die Wärmeabgabe gegeben, durch $Q = n \cdot Q_R$, so ist

$$\alpha = \frac{n \cdot Q_R}{F \cdot t_0} = \frac{n}{F} \cdot l \cdot \sqrt{2\,\alpha_0\,\lambda\,\delta} \cdot \mathfrak{T}\mathrm{ang}\, m h;$$

in dieser Formel tritt die Übertemperatur nicht mehr auf. Betrachtet man die graphische Darstellung der Funktion

Tang x (Abb. 26), so zeigt sich, daß sie bis $x = 0{,}5$ fast geradlinig verläuft, wobei $\mathfrak{T}\mathrm{ang}\, x \sim x$ ist; in diesem Bereich also bis $m \cdot h = 0{,}5$, vereinfacht sich die obige Beziehung zu

$$\alpha = \frac{n}{F} \cdot l \cdot \sqrt{2\,\alpha_0\,\lambda\,\delta} \cdot \sqrt{\frac{2\,\alpha_0}{\lambda\,\delta}} \cdot h$$

$$= \frac{n}{F} \cdot l \cdot 2\,\alpha_0 \cdot h.$$

Da nun $\alpha_0 = 5{,}3 + 4{,}55 \cdot v$ ist, so ergibt sich für das angegebene Bereich, daß die WÜZ einer berippten Fläche

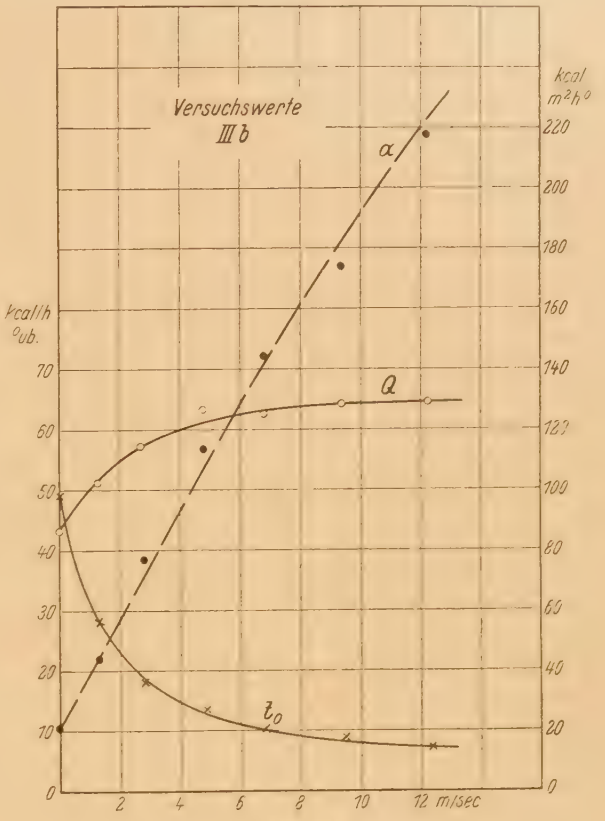
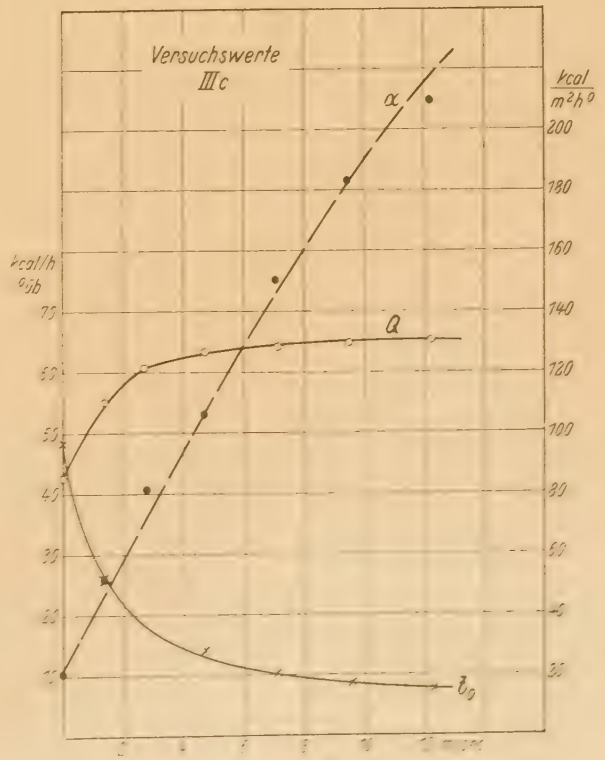


Abb. 28.



linear mit der Luftgeschwindigkeit und mit der Rippenhöhe wächst. Für $m \cdot h > 0{,}5$ verläuft die Funktion $\mathfrak{T}ang\, mh$ sehr bald flacher; $m \cdot h$ wird mit wachsendem α_0 (wachsender Luftgeschwindigkeit) und wachsender Rippenhöhe größer. Der lineare Zuwachs wird demnach für die WÜZ sowohl mit wachsender Luftgeschwindigkeit und wachsender Höhe sehr bald aufhören, und dementsprechend die Kurve sich einer Parabel nähern, da für $x = 2{,}0$ $\mathfrak{T}ang\, x$ schon fast wagerecht verläuft und $= 1$ wird. Hieraus folgt eine wichtige Überlegung; da der Materialaufwand mit höher werdenden Rippen geradlinig wächst, ist eine Erhöhung der Rippen nur wirtschaftlich, solange der Zuwachs an Wärmeübergang damit Schritt hält, d. h. auch geradlinig verläuft. Aus dieser Überlegung ergibt sich, daß für geringe Luftgeschwindigkeiten hohe, für große Luftgeschwindigkeiten

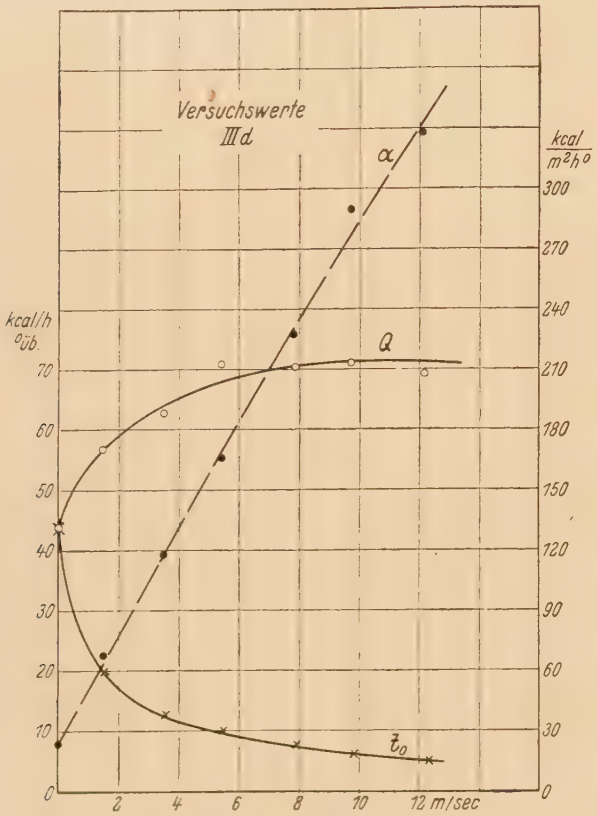


Abb. 30.

(d. h. gr. WÜZ) niedrige Rippen zweckmäßig sind, um beide Male das Produkt $m \cdot h$ klein zu halten.

Um diese Überlegung zu prüfen und Zahlenwerte für die WÜZ zu erhalten, werden nun Versuche mit verschieden berippten Flächen angestellt.

Versuchsreihe III.

Einfluß der Rippenhöhe.

Versuchsreihe III umfaßt eine Serie von Rippenelementen, deren Rippen gleichen Abstand (10 mm) und verschiedene Höhe (10 bis 40 mm) haben. Die Versuchsbedingungen sind dieselben wie bisher. Die Auswertung geschieht so, daß aus der Gesamtwärmeabgabe durch Division mit der Grundfläche (0,0416 m²) und der äußeren Temperaturdifferenz zwischen Platte und Luft die WÜZ, bezogen auf die Grundfläche, errechnet wird. Die Temperatur der Oberfläche wird auf der Innenseite mit eingelassenen Thermoelementen gemessen. Der Unterschied zwischen der Temperatur an der Innen- und Außenseite der Platte kann wegen der geringen Wandstärke vernachlässigt werden. Die Versuchswerte sind in Zahlentafel 12 bis 16 und Abb. 27 bis 31 gegeben. Die Rippen mit 20 mm Höhe sind zweimal vertreten; die eine Platte hatte Rippen, die am Fuß stärker waren, und sollte ursprünglich in einer Versuchsreihe über den Einfluß der Rippenstärke verwendet werden. Da dieser Einfluß theoretisch genügend geklärt scheint und von geringerem Ausschlag ist, wurde diese Versuchsreihe gestrichen.

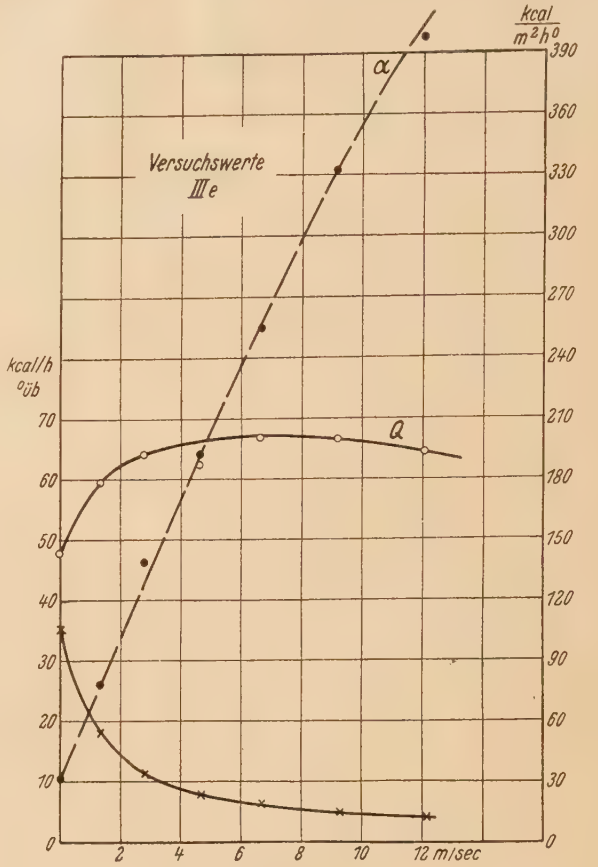


Abb. 31.

Tab No. 121

Versuchswerte III e

Rippenhöhe: 10 m/m
Gewicht: 2,373 kg

Vers. Nr		1	2	3	4	5	6	7
Datum 1928		17.1.	18.1.	18.1.	19.1.	19.1.	19.1.	19.1.
Stromstärke	Amp	2,47	2,80	3,04	3,13	3,22	3,26	3,28
Spannung	Volt	18,8	21,2	23,2	24,0	24,7	25,0	25,1
Leistung	kcal/h	39,9	51,1	60,6	64,5	68,4	70,0	70,8
Stromstärke äussen	Amp	2,52	2,65	2,70	2,78	2,72	2,68	2,68
" innen	"	1,50	1,60	1,60	1,62	1,62	1,60	1,62
Temperatur innen	°C	150,1	149,9	150,0	150,0	150,1	150,2	150,0
" der Oberfl.	"	88,2	67,5	54,0	46,8	42,2	38,3	37,7
" äussen	"	24,3	24,1	23,8	24,3	24,4	24,0	25,6
" innen	"	156,2	157,0	158,1	158,7	159,1	159,2	160,0
" " äussen	"	156,5	158,0	158,0	158,4	159,4	159,7	159,5
" im Mantel	"	150,5	150,4	149,7	149,5	149,9	151,2	151,6
" " Raum	"	21,1	21,1	20,0	21,0	20,0	20,0	20,5
Temp. Diff. innen	"	63,9	82,4	96,0	103,2	107,9	111,9	112,3
" " äussen	"	56,9	39,6	30,2	22,5	14,8	14,3	12,1
" " im ganzen	"	120,8	122,8	126,2	125,7	125,7	126,2	124,4
Umdr. des Ventilators	U/min	0	532	1100	1860	2530	3450	4630
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,4	2,9	4,9	6,7	9,1	12,2
a 1 W Ü Z innen	kcal/m²h°	15,62	15,53	15,77	15,61	15,88	15,68	15,78
a 2 W Ü Z aussen	"	16,86	31,0	48,3	68,9	94,4	117,4	140,6
K W Z	"							

Zahlentafel 12.

Die Versuchswerte beider Versuche mit 20 mm Rippenhöhe fallen zusammen. Aus den WÜZ-Kurven werden die WÜZ-Werte für dieselben Luftgeschwindigkeiten extrapoliert (Zusammenstellung s. Zahlentafel 17) und einmal bei konstanter Rippenhöhe als Funktion der Luftgeschwindigkeit, ein

zweites Mal bei konstanter Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Rippenhöhe aufgetragen (Abb. 32 und 33). Die Betrachtung der Darstellungen ergibt folgendes: Die Kurven $\alpha = f(v)_h$ sind schwach gekrümmt, d. h. mit wachsender Luftgeschwindigkeit wird die Vergrößerung der WÜZ kleiner. Dieser Verlauf wird bei höheren Luftgeschwindigkeiten als den untersuchten noch stärker in Erscheinung treten. Bei konstanter Luftgeschwindigkeit (Abb. 33) lassen sich die Punkte gleicher Rippenhöhe annähernd durch eine Schar von Geraden verbinden. Für diese Geraden ergibt sich die Beziehung

$$\alpha = \alpha_0 + (0{,}62 + v^{0{,}83}) \cdot h$$

gültig bis $h = 40$ mm bei einem Rippenabstand von 10 mm. Hierin ist $\alpha_0 = 5{,}3 + 4{,}55 \cdot v$ die WÜZ der ebenen Platte ohne Strahlung, die gleichzeitig als Versuchsreihe mit der Rippenhöhe $h = 0$ betrachtet werden kann. Bei der Besprechung der Ergebnisse von Versuchsreihe 2. war die Beziehung aufgestellt worden,

$$\lambda = \frac{n}{F} \cdot l \cdot 2\,\alpha_0 \cdot h$$

gültig, wenn das Produkt $m \cdot h$ kleiner als 0,5 ist. Mit den Werten des Versuches

$$n = 20,\ F = 0{,}0416\ \text{m}^2,\ l = 0{,}2\ \text{m}$$

wird

$$\lambda = \frac{20}{0{,}0416} \cdot 0{,}2 \cdot 2 \cdot \alpha_0 \cdot h$$
$$= 192{,}4 \cdot \alpha_0 \cdot h$$

Tab. No. 13

Versuchswerte IIb ... den ...

Rippenhöhe: 20 m/m
Gewicht: 3,195 kg

Vers. Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum 1928		17.1	17.1.	17.1.	17.1.	17.1.	17.1.	17.1.
Stromstärke	Amp	2,56	2,81	2,96	3,10	3,08	3,13	3,13
Spannung	Volt	19,6	21,2	22,6	23,8	23,6	23,9	23,9
Heizleistung	kcal/h	43,1	51,2	57,5	63,5	62,5	64,3	64,3
Stromstärke äussen	Amp	2,55	2,55	2,52	2,60	2,62	2,70	2,75
" innen	"	1,70	1,70	1,65	1,70	1,78	1,70	1,75
Temperatur innen	°C	150,0	150,2	150,0	150,0	150,2	150,2	150,3
" der Oberfl.	"	76,0	54,5	43,0	38,3	35,8	34,5	33,9
" äussen	"	26,9	26,4	25,0	24,9	25,4	25,6	25,8
" innen innen	"	156,0	156,8	157,0	157,1	157,8	157,3	158,2
" " äussen	"	156,8	158,1	157,7	157,8	159,0	158,6	159,2
" im Mantel	"	149,5	150,0	149,5	149,8	149,5	148,9	149,8
" " Raum	"	19,5	19,5	21,5	21,8	21,8	21,8	21,8
Temp. Diff. innen	"	74,0	95,7	107,0	111,7	114,4	115,7	116,4
" " äussen	"	49,1	68,1	78,0	83,4	90,4	89,9	93,1
" " im ganzen	"	123,1	123,8	125,0	125,1	124,8	124,6	123,5
Umdr. des Gebläses	U/min	–	500	1095	1850	2580	3550	4640
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,3	2,78	4,85	6,8	9,4	12,28
α_1 WÜZ innen	kcal/m²°	14,58	13,4	13,43	14,22	13,4	13,91	13,82
α_2 WÜZ aussen	"	21,1	43,8	76,8	113,9	144,5	173,7	217,8

Zahlentafel 13.

Tab. No. 14

Versuchswerte IIIc ... den ...

Rippenhöhe: 20 m/m
Gewicht: 3,23 kg

Vers. Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum 1928		14.1.	14.1.	16.1.	16.1.	16.1.	16.1.	16.1.
Stromstärke	Amp	2,55	2,90	3,05	3,11	3,12	3,14	3,15
Spannung	Volt	19,5	22,1	23,2	23,8	24,0	24,0	24,1
Heizleistung	kcal/h	42,7	55,1	60,9	63,6	64,4	64,8	65,3
Stromstärke innen	Amp	2,58	2,50	2,55	2,68	2,55	2,62	2,66
" äussen	"	1,85	1,85	1,84	1,80	1,85	1,80	1,80
Temperatur innen	°C	149,8	150,0	149,9	150,1	150,5	150,6	150,1
" der Oberfl.	"	78,0	54,6	43,8	39,6	35,9	34,5	34,5
" äussen	"	29,6	28,8	25,6	25,2	25,6	26,0	27,5
" innen innen	"	155,8	156,8	157,3	158,0	158,5	158,3	158,8
" " äussen	"	157,2	157,9	158,7	158,5	161,0	160,2	160,0
" im Mantel	"	148,7	148,7	149,4	149,2	150,3	149,9	148,7
" im Raum	"	22,1	21,2	21,1	21,8	21,9	21,9	22,5
Temp. Diff. innen	"	71,8	95,4	106,1	110,5	114,6	116,1	115,6
" " äussen	"	48,4	25,8	18,2	14,4	10,3	8,5	7,5
" " im ganzen	"	120,2	121,2	124,3	124,9	124,6	124,6	122,6
Umdr. des Zentrifugalfors	U/min	–	525	1070	1700	2690	3550	4640
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,38	2,70	4,72	7,1	9,5	12,25
α_1 WÜZ innen	kcal/m²°	14,88	14,44	14,35	14,38	14,06	13,95	14,13
α_2 WÜZ aussen	"	21,2	51,7	80,5	106,2	150,4	173,2	209,3

Zahlentafel 14.

Tab. No. 15

Versuchswerte IIId ... den ...

Rippenhöhe: 30 m/m
Gewicht: 3,794 kg

Vers. Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum 1928		17.9.	18.9.	20.9.	18.9.	27.9.	27.9.	20.9.
Stromstärke	Amp	2,55	2,93	3,07	3,37	3,26	3,21	3,22
Spannung	Volt	19,8	22,6	23,8	24,5	25,1	25,2	24,9
Heizleistung	kcal/h	43,4	56,9	62,8	71,0	70,4	71,1	69,0
Stromstärke äussen	Amp	2,55	2,60	2,61	2,60	2,62	2,66	2,62
" innen	"	1,75	1,80	1,85	1,80	1,70	1,80	1,80
Temperatur innen	°C	150,0	150,0	150,0	150,1	150,2	150,0	150,0
" der Oberfl.	"	72,6	46,6	35,3	34,8	29,3	28,6	28,0
" äussen	"	28,8	26,6	22,6	24,6	21,9	22,7	23,1
" innen innen	"	158,4	159,9	160,5	161,6	162,3	162,0	161,4
" " äussen	"	158,4	159,4	160,6	161,2	160,2	161,2	160,7
" im Mantel	"	150,8	150,8	150,7	149,3	149,2	149,0	150,0
" " Raum	"	20,3	20,0	19,8	22,8	18,0	18,0	17,3
Umdr. des Gebläses	U/min	0	546	1320	2046	2966	3720	4600
Luftgeschw.	m/sec	0	1,45	3,5	5,4	7,9	9,8	12,2
Temp. Differenz innen	°C	77,4	103,4	114,7	115,3	120,9	121,4	120,0
" " äussen	"	43,8	20,0	12,7	10,2	7,4	5,9	4,9
" " im ganzen	"	121,2	123,4	127,4	125,5	128,3	122,3	126,9
α_1 WÜZ innen	kcal/m²°	14,02	13,75	13,71	15,31	14,58	14,62	14,12
α_2 WÜZ aussen	"	23,8	68,3	118,8	167,0	228	289	329
Temp. and Syrkes Diff.	°C	70,2	44,0	32,8	32,6	26,2	26,0	25,6

Zahlentafel 15.

Tab. No. 16

Versuchswerte IIIe ... den ...

Rippenhöhe: 40 m/m
Gewicht: 4,365 kg

Vers. Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum 1928		23.1.	23.1.	23.1.	23.1.	23.1.	24.1.	24.1.
Stromstärke	Amp	2,71	3,02	3,12	3,08	3,20	3,16	3,12
Spannung	Volt	20,8	23,0	23,9	23,6	24,3	24,1	24,0
Heizleistung	kcal/h	48,0	59,7	64,2	62,5	66,8	66,5	64,4
Stromstärke äussen	Amp	2,62	2,60	2,64	2,60	2,68	2,65	2,65
" innen	"	1,70	1,80	1,95	2,02	2,08	2,0	2,0
Temperatur innen	°C	150,1	150,5	150,2	150,4	150,1	150,0	150,0
" der Oberfl.	"	59,2	40,5	33,4	30,2	28,5	27,3	27,8
" äussen	"	23,6	22,3	22,3	22,4	22,2	22,5	23,0
Temp. innen innen	"	158,2	159,8	162,0	163,8	163,4	165,6	165,5
" " äussen	"	160,0	162,0	165,0	166,0	166,0	166,0	166,5
" im Mantel	"	150,1	150,5	150,3	150,4	150,0	149,9	151,0
" " Raum	"	15,6	16,0	18,5	19,0	18,4	18,2	18,8
Temp. Diff. innen	"	90,9	110,0	116,8	120,2	121,6	122,7	122,7
" " äussen	"	35,6	18,2	11,1	7,8	6,3	4,8	3,0
" " im ganzen	"	126,5	128,2	127,9	128,0	127,9	127,5	126,6
Umdr. des Gebläses	U/min	0	500	1070	1770	2550	3500	4550
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,3	2,8	4,65	6,72	9,25	12,05
α_1 WÜZ innen	kcal/m²°	13,22	13,52	13,77	12,99	13,76	13,55	13,75
α_2 WÜZ aussen	"	32,4	78,9	139,1	192,7	255,0	333,2	397,2

Zahlentafel 16.

damit ergibt sich

für $h = 0{,}01$ m $\alpha = 1{,}92\,\alpha_0$,
» $h = 0{,}02$ » $= 3{,}85\,\alpha_0$,
» $h = 0{,}03$ » $= 5{,}77\,\alpha_0$,
» $h = 0{,}04$ » $= 7{,}69\,\alpha_0$

benutzt man diese Beziehungen, so zeigt sich, daß die getroffene Vereinfachung bei höheren Luftgeschwindigkeiten zu größeren Abweichungen führt. Eben weil dann die Vernachlässigung der $\mathfrak{Tang}$-Funktion nicht mehr zulässig ist. Der richtige Weg zur rechnerischen Ermittlung der WÜZ ist folgender:

Ich ermittle die α-Werte der Rippen mit der genauen Beziehung

$$\alpha = \frac{n}{F} \cdot l \cdot \sqrt{2\,\alpha_0\,\lambda\,\delta} \cdot \mathfrak{Tang}\sqrt{\frac{2\,\alpha_0}{\lambda\,\delta}} \cdot h$$

zu dieser WÜZ der Rippen kommt noch die der Platte selbst, soweit sie als freier Querschnitt zwischen den Rippen an der Wärmeabgabe beteiligt ist. Ich erhalte sie, indem ich die WÜZ der Platte

$$\alpha_0 = 5{,}3 + 4{,}55 \cdot v$$

mit dem Verhältnis freie Oberfläche : Gesamtfläche multipliziere, worin die freie Oberfläche gleich ist der Gesamtfläche, vermindert um das Produkt: $n \cdot$ Rippenquerschnitt. Für die vorliegende Versuchsreihe ist die Gesamtfläche $F = 0{,}0416$ m²; der Rippenquerschnitt ist gleich $0{,}2 \cdot 0{,}005$ m², die Rippenzahl $n = 20$, der freie Querschnitt ist also

$$F' = F - n \cdot F_R = 0{,}0416 - 20 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}005 = 0{,}0216 \text{ m}^2,$$

damit wird das Verhältnis $F' : F = 0{,}519$, die zusätzlichen WÜZ für den freien Plattenquerschnitt werden also bei

$v = 0, \quad 2, \quad 4, \quad 6, \quad 8, \quad 10, \quad 12$ m/s,
$\alpha_0' = 2{,}7, \quad 7, \quad 12, \quad 17, \quad 22, \quad 26, \quad 31$ kcal/m²h⁰.

Die Zusammenstellung in Zahlentafel 17 enthält folgende Werte:

- α aus den Versuchen,
- α_1 berechnet mit den vereinfachten Beziehungen,
- α_2 berechnet mit der genauen Beziehung, für die Rippen,
- $\alpha_3 = \alpha_0' + \alpha_2$ (mit Berücksichtigung des freien Querschnittes).

Die Übereinstimmung der WÜZ aus dem Versuch mit α_3 ist sehr gut. Die Abweichungen erklären sich bei $h = 30$

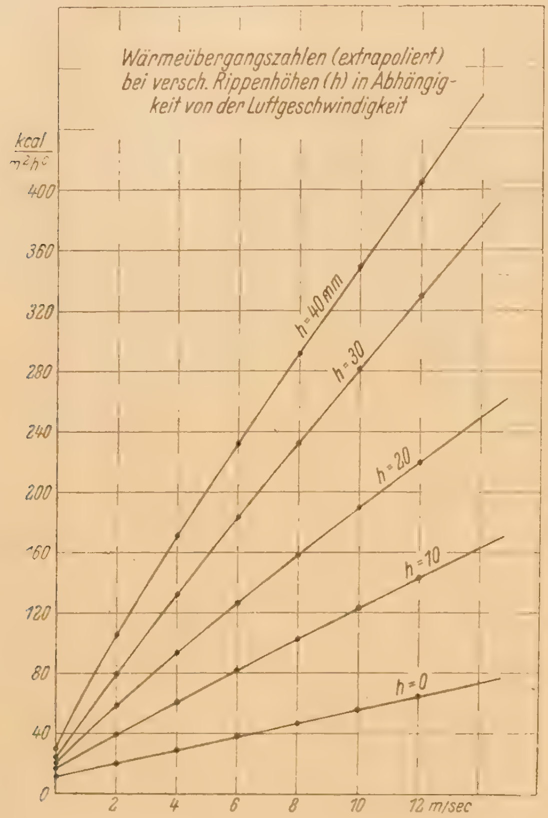


Abb. 32.

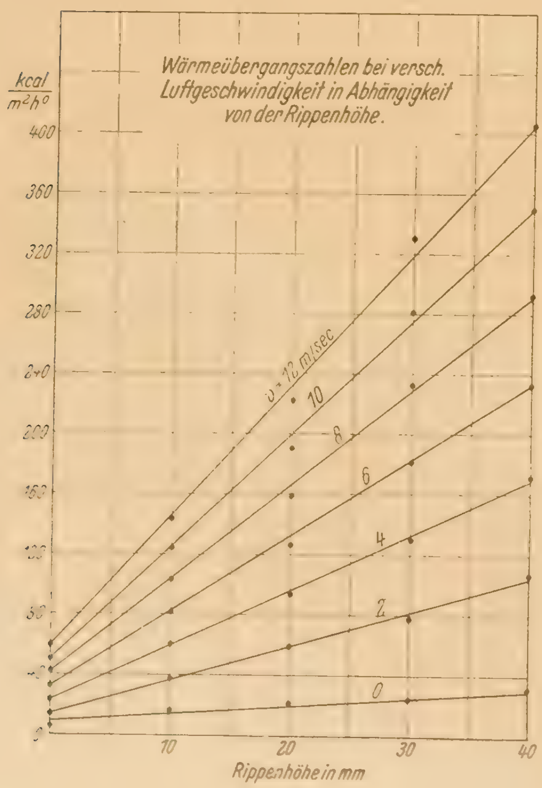


Abb. 33.

Versuchsreihe II — No. 17

Wärme-Übergangs-Zahlen extrapoliert							
Luftgeschwindigkeit m/sec	0	2	4	6	8	10	12
h = 0 α_0 = kcal/m²h°	5,3	14	24	33	42	51	60
10 α_{10}	17	39	61	82	103	124	144
20 α_{20}	21	59	94	127	159	190	221
30 α_{30}	[illegible]	[illegible]	130	181	232	281	330
40 mm α_{40}	[illegible]	100	171	232	291	348	403
[illegible]	25	90	145	[illegible]	248	[illegible]	343
[illegible]	[illegible]	2,25	[illegible]	[illegible]	6,20	[illegible]	8,58
[illegible]	0	[illegible]	[illegible]	4,36	5,58	[illegible]	7,96
[illegible]	0	[illegible]	[illegible]	4,42	5,62	6,76	7,83
Vergleich zwischen Versuch u. Rechnung							
h = 10 v m/sec	0	2	4	6	8	10	12
WÜZ α Versuch kcal/m²h°	17	39	61	82	103	124	144
α_1	10,2	27	[illegible]	[illegible]	81	98	115
α_2	[illegible]	28	45	62	79	97	113
α_3	[illegible]	35	57	79	101	123	144
h = 20 α Versuch	21	59	94	127	159	190	221
α_1	20	54	92	127	162	196	231
α_2	20	55	88	121	154	186	217
α_3	23	62	100	138	176	212	248
h = 30 α Versuch	[illegible]	[illegible]	130	181	232	281	330
α_1	[illegible]	[illegible]	162	220	283	345	406
α_2	30	[illegible]	129	175	220	262	304
α_3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	192	242	288	335
h = 40 α Versuch	30	100	[illegible]	232	291	348	403
α_1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	254	323	392	461
α_2	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	325	371
α_3	[illegible]	[illegible]	[illegible]	238	[illegible]	351	[illegible]

Zahlentafel 17.

und $h = 40$ mm daraus, daß bei niederen Luftgeschwindigkeiten die Rippenteilung zu klein ist (siehe nächste Versuchsreihe), so daß eine geringe gegenseitige Behinderung eintritt. Die Benutzung der vereinfachten Beziehung (α_1) kann nur bei niederen Luftgeschwindigkeiten und kleinen Rippenhöhen, wie ja aus der getroffenen Vereinfachung folgt, an-

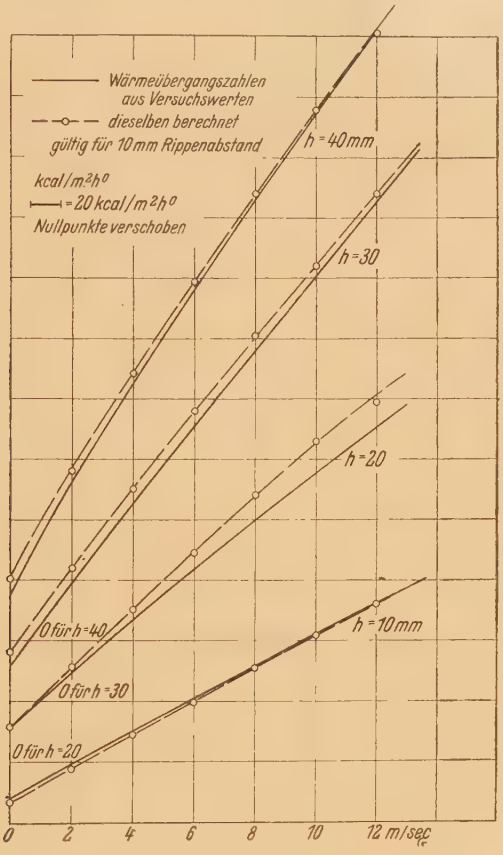


Abb. 34.

gewendet werden. Die allgemein anzuwendende Berechnung für gerade Rippen ist also die, daß die WÜZ der Rippen bezogen auf die Grundfläche gemäß

$$\alpha = \frac{n}{F} \cdot l \cdot \sqrt{2\,\alpha_0\,\lambda\delta} \cdot \mathfrak{Tang}\, m \cdot h$$

berechnet und dazu hinzugezählt wird, die WÜZ der freien

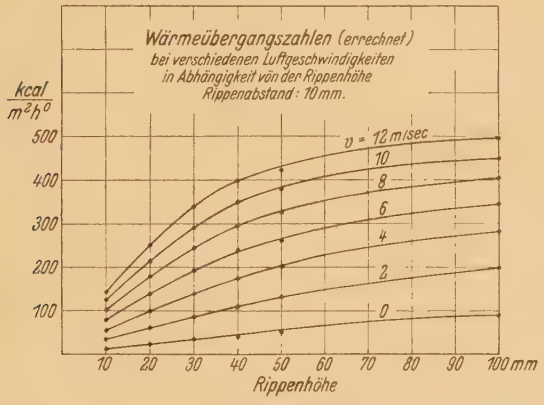


Abb. 35.

Grundfläche $\alpha_0' = \alpha_0 \cdot \frac{F'}{F}$, die Zusammenstellung dieser Werte gibt Abb. 34. Auf Grund derselben Formeln ist nun auch für $h = 50$, 60 und 100 mm die WÜZ berechnet worden (Abb. 35).

Für die Wahl der Rippenhöhe ist also einmal die Luftgeschwindigkeit maßgebend, ferner sind jedoch wie in der Einleitung ausgeführt, die Wärmeübergangsverhältnisse auf beiden Seiten zu berücksichtigen, und es ist festzustellen, ob eine Vergrößerung der WÜZ durch Erhöhung der Rippen eine entsprechende Vergrößerung der WDZ bringt, so daß die Erhöhung von Preis und Gewicht durch den erhöhten Materialaufwand wirtschaftlich erscheint. Es ist dabei von Wert, die Vervielfachung des Gewichtes mit der Vervielfachung der WÜZ zu vergleichen. Die Gewichte der untersuchten Einzelrippen sind bei

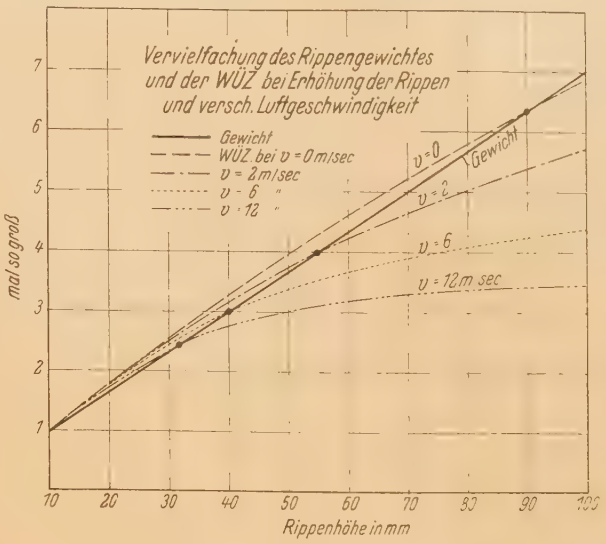


Abb. 36.

$h =$	10	20	30	40	mm
	0,05	0,084	0,117,	0,15	kg
d. h.	1	1,68	2,34	3,0	mal so groß

als bei $h = 10$ mm. Ebenso kann man die Vervielfachung der WÜZ auf 1 bei $h = 10$ mm beziehen. Die graphische Darstellung in Abb. 36 zeigt, daß zunächst die Vervielfachung der WÜZ rascher wächst als die des Gewichtes. Dann nimmt die Neigung wieder ab, bis schließlich die WÜZ-Kurve die Gewichtskurve schneidet und weiterhin flacher wird. Bis zum Schnittpunkt ist die Erhöhung immer noch wirtschaftlich, von da an aber können wir von einem schlech-

Tab No. 18

Versuchswerte IV a

Rippenabstand: 6 m/m

Vers. Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum 1928		24.1	24.1	24.1	24.1	24.1	24.1	25.1
Stromstärke	Amp	2,43	2,74	2,89	3,04	3,12	3,10	3,10
Spannung	Volt	43,2	20,9	22,0	23,2	23,9	23,8	23,8
Heizleistung	kcal/h	38,9	49,2	54,6	60,6	64,2	63,5	63,5
Stromstärke außen	Amp	2,52	2,58	2,58	2,58	2,63	2,65	2,61
" innen	"	1,95	1,98	1,98	1,92	1,90	1,90	1,85
Temperatur innen	°C	150,2	149,8	150,0	150,0	150,2	150,2	150,0
" der Oberfläche	"	159,0	58,5	47,5	37,8	36,0	33,4	34,8
" außen	"	27,1	24,4	22,3	22,3	25,0	25,1	27,2
" innen innen	"	159,0	159,5	160,6	160,6	161,5	161,5	161,0
" " außen	"	159,0	162,0	162,6	162,5	161,8	163,2	162,2
" im Kanal	"	149,9	150,8	150,1	150,5	149,7	150,4	148,3
" im Raum	"	19,2	18,8	18,5	19,1	20,6	20,3	21,8
Temp. Diff. innen	"	71,9	91,3	102,5	112,2	114,0	116,8	115,2
" " außen	"	51,2	34,1	25,2	15,5	11,0	8,3	7,6
" " im ganzen	"	123,1	125,4	127,7	127,7	125,0	125,1	122,8
Umdr. des Gebläses	Umd/min	0	545	1000	1810	2540	3350	4610
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,42	2,80	4,80	6,70	8,85	12,20
WÜZ innen α_1	kcal/m²h°	13,52	13,49	13,32	13,40	14,06	13,67	13,77
WÜZ außen α_2	"	11,26	34,7	52,1	94,0	140,3	144,0	201,0

Zahlentafel 18.

Tab. No. 19

Versuchswerte II b

Rippenabstand: 8 m/m

Vers. Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum	1928	26.1.	26.1.	26.1.	26.1.	26.1.	27.1.	27.1.
Stromstärke	Amp	2,44	2,77	2,98	3,04	3,03	3,08	3,08
Spannung	Volt	18,5	21,1	22,9	23,1	23,1	23,5	23,8
Heizleistung	kcal/h	38,8	50,3	58,6	60,4	60,2	62,3	63,0
Stromstärke innen	Amp	2,55	2,58	2,60	2,60	2,60	2,59	2,60
" aussen	Amp	1,80	1,80	2,02	1,92	1,92	1,92	1,80
Temperatur innen	°C	150,0	150,0	150,0	150,0	150,2	150,0	150,0
" der Oberfl.	"	74,4	53,0	39,6	37,5	35,3	32,6	32,8
" aussen	"	26,6	26,2	23,0	25,6	25,0	24,8	26,4
" unten innen	"	159,1	162,5	161,2	162,0	162,0	164,5	165,0
" " aussen	"	160,0	160,2	162,8	162,2	162,8	163,5	164,0
" im Mantel	"	150,5	151,0	150,5	150,2	150,6	149,5	149,1
" im Raum	"	19,2	19,0	19,1	21,3	21,2	20,2	21,2
Temp. Differenz innen	"	75,6	97,0	110,4	112,5	114,9	117,4	117,2
" " aussen	"	47,8	26,8	16,6	11,9	10,3	7,8	6,4
" " ungarnen	"	123,4	123,8	127,0	124,4	125,2	125,2	123,6
Umdr. des Gebläses	U/min	0	540	1110	1850	2600	3550	4560
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,4	2,9	4,85	6,88	9,4	12,08
W.Z. innen α_1	kcal/m²h	12,78	12,98	13,26	13,42	13,10	13,25	13,40
W.Z. aussen α_2	"	14,5	42,2	84,9	122,0	140,4	192,0	236,8

Zahlentafel 19.

Tab. No. 21

Versuchswerte II d

Rippenabstand: 20 m/m

Vers. Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum	1928	31.1.	31.1.	1.2.	1.2.	1.2.	2.2.	2.2.
Stromstärke	Amp	2,57	2,87	3,07	3,16	3,20	3,26	3,25
Spannung	Volt	19,8	22,0	23,6	24,1	24,6	25,0	25,0
Heizleistung	kcal/h	43,8	54,3	62,3	65,4	67,6	70,1	69,8
Stromstärke innen	Amp	2,59	2,62	2,68	2,69	2,69	2,65	2,62
" aussen	"	1,80	1,98	2,0	1,95	2,0	2,11	2,00
Temperatur innen	°C	150,0	150,0	150,1	150,0	149,9	150,0	150,0
" der Oberfl.	"	79,3	63,8	50,5	45,8	43,6	38,8	37,9
" aussen	"	27,9	24,6	23,7	24,5	25,4	23,6	25,1
" unten innen	"	161,5	163,0	164,5	164,8	165,5	166,3	166,4
" " aussen	"	161,5	163,2	164,2	164,7	165,8	166,4	166,7
" im Mantel	"	150,4	150,1	150,1	150,2	150,4	150,3	149,9
" im Raum	"	20,2	20,0	20,1	21,3	21,2	19,4	19,9
Temp. Differenz innen	"	70,7	86,2	99,6	104,2	106,3	111,2	112,1
" " aussen	"	51,4	39,2	26,8	27,3	18,2	15,2	12,8
" " ungarnen	"	122,1	125,4	126,4	125,5	124,5	126,4	124,9
Umdr. des Gebläses	U/min	0	510	1100	1800	2510	3510	4570
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,33	2,9	4,73	6,6	9,3	12,1
W.Z. innen α_1	kcal/m²h	15,46	15,78	15,62	15,68	15,89	15,76	15,58
W.Z. aussen α_2	"	20,5	33,3	55,9	73,8	89,5	110,9	131,1

Zahlentafel 21.

ten »Materialwirkungsgrad« sprechen. Der Schnittpunkt liegt bei $v = 0$ erst bei einer Rippenhöhe von 90 mm, das Maximum ist schon bei $h = 50$ erreicht; bei $v = 12$ m/s liegt der Schnittpunkt bereits bei $h = 30$ mm. Wenn also auch bei $v = 12$ m/s eine Erhöhung der Rippen über 30 mm noch eine Vergrößerung der WÜZ bringt, so geschieht das doch mit schlechtem Wirkungsgrad.

Wichtiger als diese allgemeine Betrachtung ist der Nachweis, daß die angegebene Berechnungsart für gerade Rippen anwendbar ist und damit jeder einzelne Fall rechnerisch nachgeprüft werden kann.

Versuchsreihe IV.

Einfluß der Rippenteilung.

In der im vorigen Kapitel aufgestellten Beziehung für die WÜZ einer berippten Fläche erscheint die WÜZ direkt abhängig von der Rippenzahl; durch eine beliebig weitgehende Erhöhung der Rippenzahl könnte also eine entsprechende Vergrößerung der WÜZ erreicht werden. Hier muß nun die Einschränkung gemacht werden, daß die mit der Erhöhung der Rippenzahl verbundene Verringerung des Rippenabstandes nur soweit gehen darf, daß eine gegenseitige Störung benachbarter Rippenflanken vermieden wird. Zur Klärung dieser Frage ist die Versuchsreihe IV mit einer Serie von Rippenelementen durchgeführt worden, die gleiche Höhe (20 mm) und verschiedenen Abstand voneinander haben (6 bis 20 mm). Die Versuchswerte sind in Zahlentafel 18 bis 21 und Abb. 37 bis 40 gegeben. Trägt man die errechneten WÜZ bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten über der Teilung auf, so ergeben sich Kurven (Abb. 41), die bei einer bestimmten Teilung ein Maximum haben. Dieses Maximum wandert dabei bei abnehmender Luftgeschwindig-

Tab. No. 20

Versuchswerte II c

Rippenabstand 15 m/m

Vers. Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum	1928	27.1.	27.1.	28.1.	28.1.	28.1.	29.1.	29.1.
Stromstärke	Amp	2,47	2,75	2,94	2,92	3,01	3,05	3,03
Spannung	Volt	18,4	21,0	23,0	22,2	23,0	23,3	23,1
Heizleistung	kcal/h	40,1	49,7	59,1	55,7	59,5	61,1	60,2
Stromstärke innen	Amp	2,55	2,60	2,66	2,69	2,63	2,63	2,66
" aussen	"	1,90	1,97	1,99	2,05	1,92	1,92	1,93
Temperatur innen	°C	150,0	150,0	150,0	150,0	150,2	150,0	150,0
" d. Oberfl.	"	73,7	55,0	40,0	36,2	35,1	33,8	33,6
" aussen	"	26,1	25,5	19,7	21,5	23,4	24,1	26,0
" unten innen	"	160,2	162,0	163,2	163,6	163,5	163,8	164,5
" " aussen	"	161,0	162,3	162,1	164,7	163,7	163,9	164,6
" im Mantel	"	149,7	150,0	149,2	150,0	149,7	149,5	149,9
" im Raum	"	18,5	20,5	17,2	18,1	19,8	19,2	20,0
Temp. Differenz innen	"	74,3	95,0	110,0	113,8	115,1	116,2	116,5
" " aussen	"	44,6	24,5	20,3	14,7	11,7	9,7	7,6
" " ungarnen	"	123,9	124,5	130,3	128,5	126,8	125,9	124,1
Umdr. des Gebläses	U/min	0	490	1110	1820	2530	3500	4610
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,3	2,9	4,8	6,7	9,25	12,2
W.Z. innen α_1	kcal/m²h	12,64	13,08	13,44	12,25	12,91	13,12	12,92
W.Z. aussen α_2	"	27,6	40,5	70,0	91,1	122,2	151,5	190,4

Zahlentafel 20.

Tab. No. 22

Versuchswerte II a

Aluminium
Rippen-Höhe 20 m/m Gewicht: 0,995 kg.
" -Abstand: 15 "

Vers. Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum	1928	12.9.	12.9.	13.9.	13.9.	13.9.	13.9.	13.9.
Stromstärke	Amp	2,43	2,82	3,01	3,10	3,22	3,20	3,24
Spannung	Volt	18,8	21,8	23,2	24,0	25,0	24,8	25,0
Heizleistung	kcal/h	39,4	54,8	60,1	64,0	69,2	68,2	69,6
Stromstärke innen	Amp	2,50	2,52	2,58	2,60	2,56	2,60	2,62
" aussen	Amp	1,70	1,75	1,80	1,85	1,90	1,90	1,90
Temperatur innen	°C	150,2	150,1	150,2	150,1	149,8	150,4	150,1
" der Oberfl.	"	81,0	60,0	47,7	41,6	37,8	36,8	35,8
" aussen	"	30,1	27,7	23,9	23,8	24,1	25,8	27,2
" unten innen	"	157,5	158,6	159,5	160,5	160,2	161,0	161,4
" " aussen	"	158,2	158,6	159,5	160,5	160,2	161,0	161,4
" im Mantel	"	150,2	149,8	150,1	150,2	149,1	149,5	149,0
" " Raum	"	22,8	22,2	21,6	21,2	21,2	22,0	21,2
Temp. Differenz innen	"	69,2	90,1	102,5	108,5	112,0	113,6	114,3
" " aussen	"	50,9	31,3	23,8	17,8	13,7	11,0	8,6
" " ungarnen	"	120,1	122,4	126,3	126,3	125,7	124,6	122,9
Umdr. des Gebläses	U/min	0	534	1062	1744	2628	3564	4588
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,4	2,8	4,6	6,95	9,4	12,13
W.Z. innen α_1	kcal/m²h	14,22	14,64	14,62	14,72	15,41	14,99	15,19
W.Z. aussen α_2	"	18,62	34,3	60,7	86,4	121,2	148,9	194,4

Zahlentafel 22.

keit von Werten kleinerer Teilung zu solchen größerer Teilung; zu kleinen Luftgeschwindigkeiten sind also größere

Tab. No. 23

Versuchswerte V b.

Aluminium
Rippenhöhe: 30 m/m Gewicht 1,417 kg
Rippen-Abstand 10 "

Vers. Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Zahlen	1928	14.9	14.9	14.9	14.9	15.9	15.9	15.9
Stromstärke	Amp	2,34	2,65	2,73	2,40	3,00	3,00	2,98
Spannung	Volt	18,0	20,5	21,0	22,3	23,1	23,1	23,0
Heizleistung	Kal/h	36,2	44,0	49,3	55,6	59,6	59,6	59,0
Temperatur innen	°C	150,1	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150,3	
" der Oberfl.	"	65,0	43,3	34,8	30,5	26,8	27,2	27,6
" außen	"	28,0	26,7	23,7	22,7	21,3	22,5	24,0
" unten innen	"	155,9	157,0	158,0	158,3	159,0	159,4	160,1
" " außen	"	157,1	159,2	161,3	161,0	157,9	159,6	159,6
" im Kanal	"	150,8	151,0	152,0	151,0	150,2	149,0	148,0
" " Raum	"	20,5	20,5	20,0	19,6	18,6	18,9	18,9
Temp Differenz innen	"	85,1	106,7	115,2	119,5	123,2	122,8	122,7
" " außen	"	37,0	16,6	11,1	7,8	5,5	4,7	3,6
" " mzanen	"	122,1	123,3	126,3	127,3	128,7	127,5	127,3
Umdr. des Gebläses	U/min	0	532	1046	1784	2800	3526	4616
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	1,4	2,75	4,7	7,4	9,3	12,2
W.Ü.Z. innen d. 1	Kal/m²h°	10,63	10,32	10,70	11,62	12,08	12,12	12,02
W.Ü.Z. außen d. 2	"	23,5	63,7	106,8	171,6	260,0	305	294
Stromstärke außen	Amp	2,55	2,60	2,55	2,55	2,60	2,60	2,60
" innen	"	1,70	1,75	1,80	1,75	1,65	1,65	1,65
		Fachpoliert.						
Aluminium h-20 a-15	Kal/m²h°	18	47	77	107	135	164	191
Eisen " "	"	22	51	80	109	136	163	188
Aluminium h-30 a-10	"	23	87	150	211	272	331	389
Eisen " "	"	24	78	130	181	232	281	330
bei v=		0	2	4	6	8	10	12
W.Ü.Z. für Al h-30 berechnet:	"	33	90	146	201	256	310	363

Zahlentafel 23.

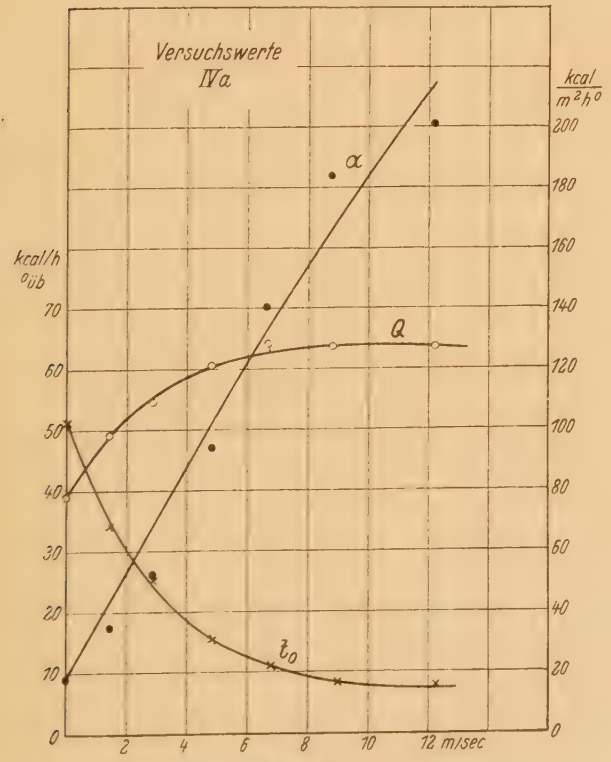


Abb. 37.

Rippenabstände nötig als zu größeren, um eine gegenseitige Beeinflussung zu vermeiden. Dieses Ergebnis deckt sich mit der Theorie der Grenzschicht. Unter der Grenzschicht der Strömung versteht man den Abstand von einer Fläche, in dem die Geschwindigkeit von dem Wert 0 an der Fläche selbst auf den Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit

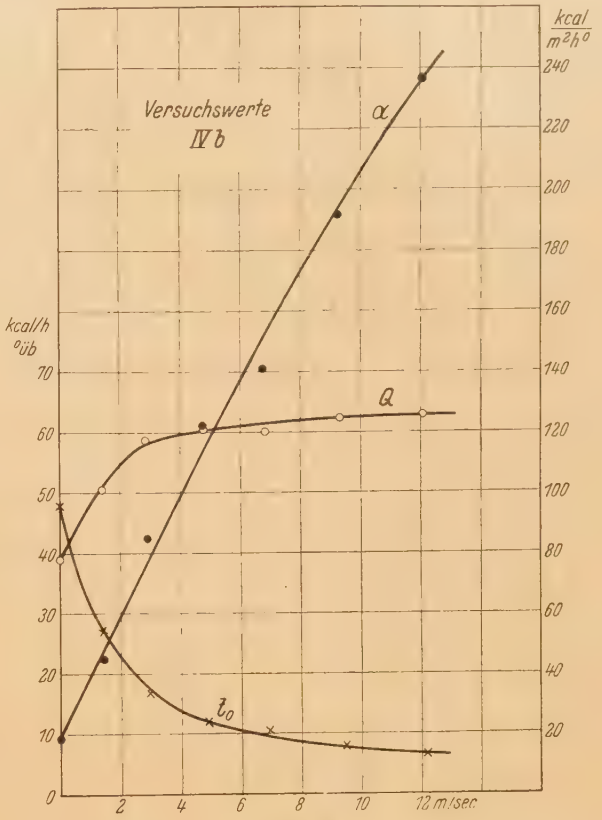


Abb. 38.

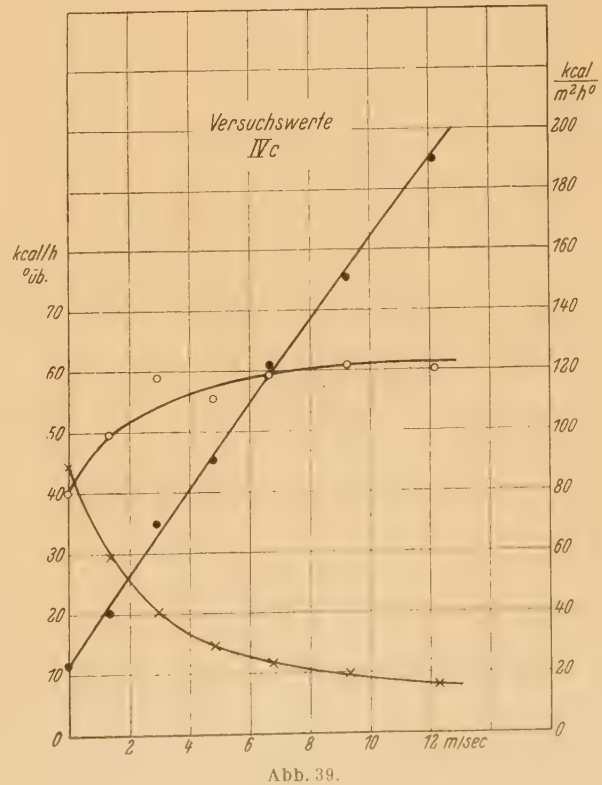


Abb. 39.

im Strömungsgebiet wächst. In dieser Grenzschicht erfolgt auch der Wärmeübergang. Wenn also zwei benachbarte Flächen sich in ihrer Wärmeabgabe durch Berührung nicht stören sollen, so müssen sie um die doppelte Grenzschicht

voneinander entfernt sein. Über die Dicke der Grenzschicht liegen folgende Beziehungen vor: Nach Blasius ist für laminare Strömung

$$\delta_g = 5{,}83 \cdot \sqrt{\frac{\nu \cdot l}{w}}$$

worin δ_g = Grenzschichtdicke in cm, ν = kinematische Zähigkeit in cm²/s, l = Entfernung von der Einströmkante

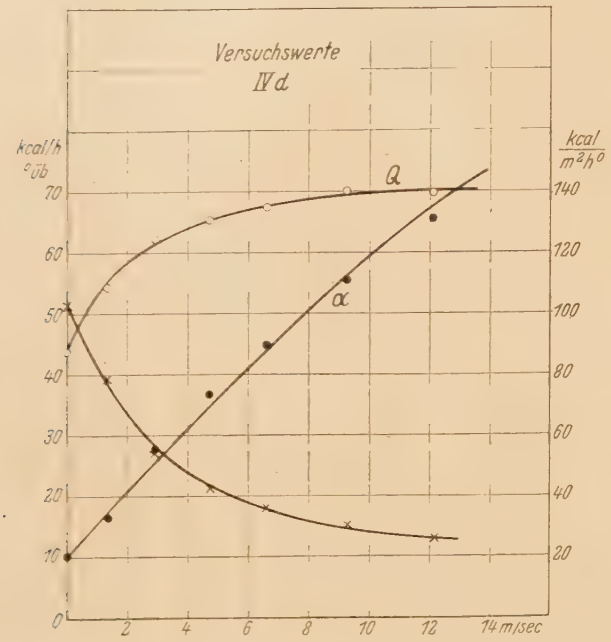


Abb. 40.

in cm und w = Geschwindigkeit in cm/s bedeutet. Für turbulente Strömung ist nach Kármán

$$\delta_g = 0{,}37 \cdot l^{4/5} \cdot \left(\frac{\nu}{w}\right)^{1/5}$$

Aus den Versuchswerten läßt sich für die günstigste Teilung die Beziehung (Abb. 43)

$$a = 12{,}63 \cdot \left(\frac{1}{v}\right)^{1/5} \text{mm}$$

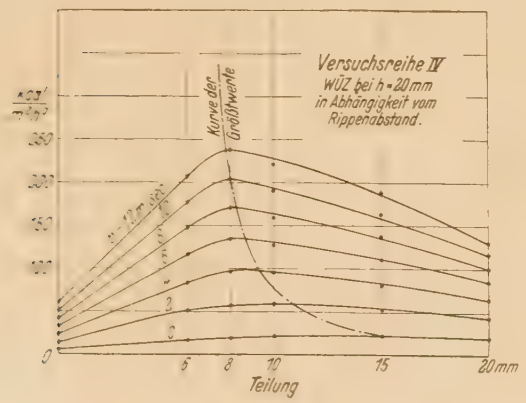


Abb. 41.

ableiten. Die Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit ist demnach dieselbe wie in der Formel von Kármán. Es ist ja auch anzunehmen, daß zwischen den Rippen infolge der kleinen Querschnitte und der Störung durch die Rippenkanten turbulente Strömung vorliegen wird. Bestimmt man die Konstanten in der Kármánschen Formel für den vorliegenden Fall, so ergibt sich mit $l = 20$ cm; $\nu = 0{,}165$ cm²/sec für Luft von 1 at und 30°) und mit $w = v \cdot 100$

$$a = 11{,}3 \cdot \left(\frac{1}{v}\right)^{1/5}.$$

Die graphische Darstellung in Abb. 42 zeigt, daß die Werte nach Kârmân nur um wenig unter den Versuchswerten liegen. Danach kann die Teilung der Rippen fast bis auf die einfache Grenzschichtdicke herabgesetzt werden, wie es z. B. auch Schmidt vorschlägt, da die gegenseitige Behinderung in der äußeren Grenzschicht nur gering ist. Behalten wir die Konstante mit 12,63 bei, so ergibt sich, wenn wir l herausziehen,

$$a = 1{,}15 \cdot l^{4/5} \left(\frac{1}{v}\right)^{1/5} \text{mm}$$

als günstigster Rippenabstand.

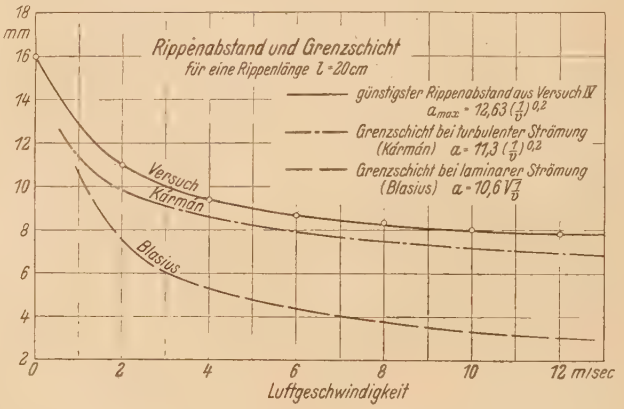


Abb. 42.

Für $v = 0$, d. h. natürliche Luftbewegung, versagt diese Beziehung; aus den Versuchen ergeben sich für diesen Fall die Werte 15 bis 20 mm, unter die man bei natürlicher Luftbewegung nicht heruntergehen soll. Für hohe Luftgeschwindigkeit nähert sich a einem Endwert, der ungefähr bei 7 mm liegt, der also in keinem Fall unterschritten werden sollte.

Versuchsreihe V.

Einfluß des Materiales.

Um den Einfluß des Rippenmateriales nachzuprüfen, wurden Versuche mit denselben Rippenelementen wie in

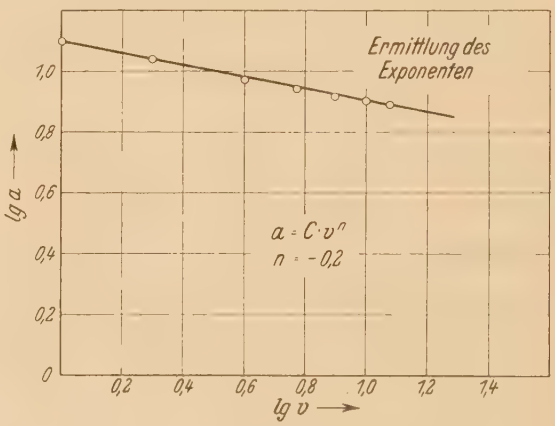


Abb. 43.

Versuch 3e und 4c aus Aluminium gemacht. Die Verwendung von Aluminium kann einmal nur aus Gründen der Gewichtsersparnis, zweitens wegen der größeren Wärmeleitzahl des Aluminiums gegenüber Eisen erfolgen.

Betrachten wir wieder die Beziehung

$$\lambda = \frac{n}{F} \cdot l \cdot \sqrt{2\,\alpha_0\,\lambda\delta} \cdot \mathfrak{T}\text{ang} \sqrt{\frac{2\,\alpha_0}{\lambda\delta}} \cdot h,$$

so folgt, daß für kleine Werte von $m \cdot h$ ($\mathfrak{T}\text{ang}\ m \cdot h \sim mh$) die Wärmeleitzahl aus der Gleichung herausfällt.

Damit wird

$$\lambda \sim \frac{n}{F} \cdot l \cdot 2\,\alpha_0 \cdot h.$$

Für kleine Rippenhöhen oder kleine Luftgeschwindigkeiten wird also hinsichtlich der WÜZ kein Unterschied bestehen. Hier tritt lediglich die Gewichtsersparnis (spez. Gewicht für Gußeisen 7250 kg/m³, für Aluminium 2500 kg pro m³) in Erscheinung, dasselbe Rippenprofil vorausgesetzt.

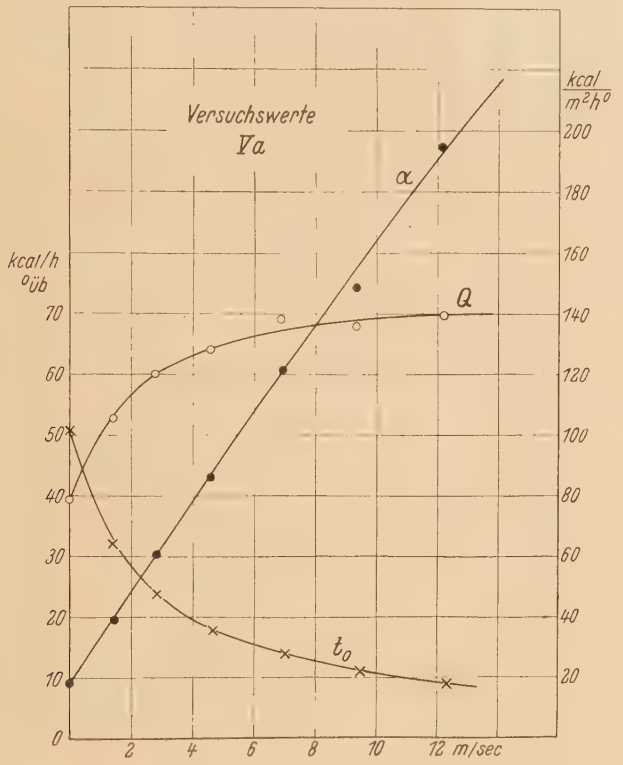


Abb. 44.

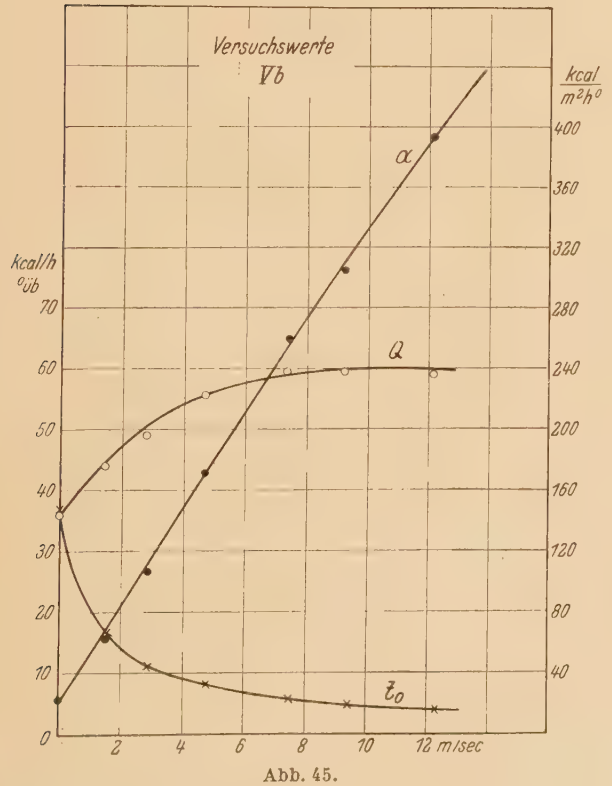


Abb. 45.

Aluminiumrippen können am Fuß etwas schwächer gehalten werden als gleich hohe Gußeisenrippen, da wegen der besseren Wärmeleitfähigkeit ein geringerer Querschnitt zum Transport der Rippenwärme genügt. Die dadurch erzielbare Gewichtsersparnis kann sich aber nur dort auswirken, wo eine Verkleinerung der Fußstärke aus gießtechnischen und Gründen der Festigkeit überhaupt möglich ist.

Für größere Rippenhöhen oder Luftgeschwindigkeiten muß wegen des Einflusses der Wärmeleitzahl die WÜZ der Aluminiumrippen größer als die von gußeisernen werden.

Diese aus der Formel gelesenen Erkenntnisse werden durch die Versuche (Zahlentafel 22 und 23 und Abb. 44 bis 46) bestätigt. Bei $h = 20$ mm fallen die α-Werte für Aluminium und Gußeisen praktisch zusammen. Bei $h = 30$ mm steigt die Kurve steiler an und übersteigt bei 12 m/s schon um 20% die WÜZ von Gußeisen. Sie kommt fast an die Werte der Versuchsreihe IIIe ($h = 40$ mm) heran, so daß der Gewichtsmehraufwand für Gußeisen in diesem Falle 3,1mal so groß ist. Die Tatsache, daß die berechneten α-Werte wie in Versuchsreihe III eine gute Übereinstimmung mit den Versuchswerten ergeben, zeigt wieder die Anwendungsmöglichkeit der theoretischen Beziehung. Wenn sich

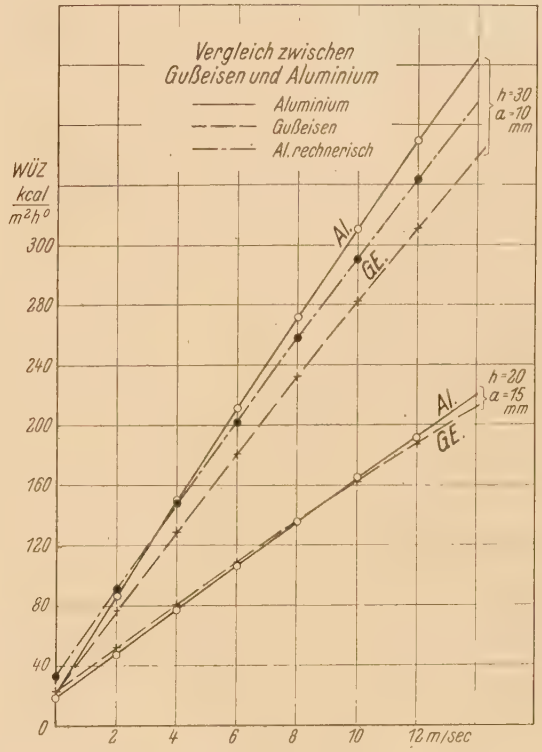


Abb. 46.

in der Literatur Angaben finden, daß die Verwendung von Aluminium für Kühlrippen $^1/_{12}$ des Gewichtsaufwandes bei Gußeisen erfordert, so ist dieser Wert nur bedingt richtig; denn, wie oben gesagt, läßt sich die theoretisch mögliche Verkleinerung der Rippenstärke praktisch nur selten verwirklichen. Daß bei luftgekühlten Verbrennungsmotoren mit Aluminiumkopf so gute Kühlungsergebnisse erzielt werden, steht dazu nicht im Widerspruch; hier hat das Aluminium die Aufgabe, die auf die kleine Fläche des Verbrennungsraumes anfallende große Wärmemenge rasch an die Zylinderfläche abzuleiten, um Temperaturunterschiede auszugleichen und die gesamte Fläche soweit wie möglich an der Wärmeabgabe zu beteiligen. Der Vorteil liegt nur zum Teil in der vermehrten Wärmeabgabe des Aluminiumkopfes selbst, zum größeren Teil in der verbesserten Wärmeableitung an die Flächen geringerer Wärmebelastung.

Kreisrippen.

Um in Anlehnung an möglichst übersichtliche Formeln die Versuche durchführen zu können, sind die besprochenen Versuchsreihen an geraden Rippen gemacht worden. Diese Einschränkung hat ja auch zur versuchsmäßigen Feststellung der Beziehungen über Rippenhöhe und Teilung geführt, die

sich mit den theoretischen gut decken. Nun ist aber die Verwendung von geraden Rippen auf einzelne Sonderfälle beschränkt, und wir finden in der Hauptsache Kreisringrippen. Die Ableitung für die Wärmeabgabe von Kreisrippen führt auf Funktionen höherer Ordnung, und die so gewonnenen, für die Praxis kaum verwendbaren Formeln haben doch nur Gültigkeit, wenn die Temperatur- und Strömungsverhältnisse, wie bei der Ableitung vorausgesetzt, längs der ganzen Rippe gleich sind. Da dies nun nicht der Fall ist, fragt es sich, ob es nicht vorteilhafter ist, die einfacheren Beziehungen für gerade Rippen zu übertragen. Dies wird ebenso möglich sein wie die Anwendung der Wärmeübertragungsbeziehungen von ebenen Platten auf Zylinder, vorausgesetzt, daß nur das Gesamtergebnis und die mittlere WÜZ interessieren.

Diese Vereinfachung wird sicher in der Genauigkeitsgrenze liegen, die bei der Anwendung der Formel für Kreisringrippen durch die Unsicherheit in der Annahme der Strömungs- und Temperaturverhältnisse auf verschiedenen Zylinderseiten gegeben ist.

Die Formel für die Wärmeabgabe einer geraden Rippe lautet vor der endgültigen Umformung

$$Q = t_a \cdot \frac{\alpha_0 \cdot U}{m} \cdot \mathfrak{Tang}\, m h,$$

worin

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_0 \cdot U}{\lambda \cdot f}}.$$

Für die Kreisrippe wird theoretisch

$$U = 2\, d_m \cdot \pi; \qquad f = \delta \cdot d_m \cdot \pi$$

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_0 \cdot 2\, d_m \pi}{\lambda \cdot \delta \cdot d_m \pi}} = \sqrt{\frac{2\,\alpha_0}{\lambda\,\delta}},$$

wenn d_m der mittlere Rippendurchmesser ist, also

$$Q = t_a \cdot d_m \pi \cdot \sqrt{2\,\alpha_0\, \lambda\, \delta} \cdot \mathfrak{Tang} \sqrt{\frac{2\,\alpha_0}{\lambda\,\delta}} \cdot h,$$

die WÜZ wird damit

$$\alpha = \frac{n \cdot Q}{t_a \cdot F} = \frac{n}{F} \cdot d_m \pi \cdot \sqrt{2\,\alpha_0 \cdot \lambda\,\delta} \cdot \mathfrak{Tang}\, m h,$$

dazu kommt noch die Wärmeabgabe der Fläche zwischen den Rippen mit

$$\alpha_0 \cdot \frac{F'}{F}.$$

Diese Beziehung wird solange Gültigkeit haben, wie tatsächlich der mittlere Umfang der Rippe gleichmäßig an der Wärmeabgabe beteiligt ist. Dies wird nur bei niedrigen Luftgeschwindigkeiten, d. h. bei natürlicher oder geringerer künstlicher Luftbewegung der Fall sein. Dabei zeigt nämlich das Strömungsbild vor unter hinter dem Zylinder einen gleichmäßigen Verlauf bei nur geringer Wirbelbildung. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten entsteht jedoch vor und hinter dem Zylinder ein toter Winkel, hervorgerufen durch die Wirbelbildung an diesen Stellen (Abb. 52). Es ist zu erwarten, daß mit wachsender Luftgeschwindigkeit die wirkliche WÜZ von der errechneten abweicht, und daß diese Abweichung von der Luftgeschwindigkeit abhängig ist.

Die Versuche 6a und b sind an einem Messingzylinder durchgeführt, dessen Abmessungen Abb. 47 zeigt. Der Zylinder wurde innen durch einen zylindrischen Heizkörper von 5,1 Ohm Widerstand auf 150° geheizt, ebenso der innere Kasten, auf den der Zylinder aufgesetzt war, um das Temperaturgefälle nach unten gleich 0 zu machen.

Die Temperatur im Zylinder wurde mit 4 Thermometern, die oben im Zylinder eingegipst waren und durch die Kanaloberwand herausragten, die Oberflächentemperatur mit 20 Thermoelementen gemessen (Abb. 9). Da eine Lötung zwischen den Rippen oder im Zylinder unmöglich war, wurden die Thermoelemente mit ihren Lötköpfen in Bohrungen von 2,2 mm Dmr. hineingehämmert, nachdem vorher die Drähte von außen durch die Bohrungen hindurchgezogen worden waren. Wenn hierbei auch die Drähte nicht über

Tab. No. 24

Versuchswerte VI. a

Zylinder
Rippenhöhe: 40 m/m

Vers. Nr.		1	2	3	4	5	6	
Datum 1928		9.11.	9.11.	10.11.	10.11.	10.11.	10.11.	
Stromstärke	amp	4,40	4,52	4,68	4,90	5,05	5,25	
Spannung	Volt	22,5	23,0	24,0	25,1	26,0	27,0	
Heizleistung	Kcal/h	85,1	89,4	96,6	105,8	113,0	121,9	
Stromstärke im Kasten	Amp	2,40	2,50	2,60	2,55	2,80	2,75	
Temp. im Zylinder	°C	150,0	150,7	150,1	150,0	149,8	150,0	
Temp. der Oberfl. oben	"	43,0	39,6	34,8	30,2	32,5	32,1	
" " " vorn	"	45,0	41,8	36,3	32,2	35,3	35,0	
" " " Seite	"	46,5	43,2	38,6	34,0	35,5	36,0	
" " " Seite	"	46,5	43,1	38,3	31,9	34,5	33,8	
" " " hinten	"	50,4	47,0	40,8	35,8	37,5	36,1	
Mittelwert-gesamt	"	45,0	43,0	37,8	33,0	34,9	34,7	
" " Zyl. Fläche	"	47,1	44,0	38,6	33,6	35,8	35,2	
Temp. aussen	"	25,8	25,5	23,2	20,3	23,5	23,5	
" aussen oben	"	20,6	22,4	21,6	19,3	23,0	23,0	
" im Kasten	"	149,0	149,5	149,0	150,5	149,3	149,7	
" " Raum	"	19,0	21,1	21,1	18,8	21,0	21,0	
Umdr. des Gebläses	U/min	270	505	1042	1740	2639	3482	
Luftgeschwindigkeit	m/sec	1,1	1,96	4,08	6,95	10,2	13,3	
Temp. Differenz innen	°C	105,0	107,7	112,3	117,0	114,9	115,3	
" " aussen oben	"	22,4	17,2	13,2	10,9	9,5	9,1	
" " aussen	"	21,3	18,5	15,4	13,3	12,3	11,7	
WÜZ innen	Kcal/m²h°	12,32	12,62	13,06	13,72	14,94	16,0	
Gesamt-Wärmeabgabe	Kcal/h	85,1	84,4	96,6	105,8	113,0	121,9	
Wärmeabg. oben	"	2,3	2,4	3,1	4,0	5,0	6,2	
" der Rippenfl.	"	82,8	87,0	93,5	101,8	108,0	115,7	
WÜZ der Rippenfl.	Kcal/m²h°	67,0	81,1	104,6	132,1	151,4	170,5	
WÜZ extrapoliert								
bei v =	m/sec	0	2	4	6	8	10	12
WÜZ (Versuch)	Kcal/m²h°	40	83	105	123	138	151	163
" (rechnerisch)	"	41,7	109,2	170,8	228,1	281,9	332,3	379,4
f = α Vers : α rechn		~ 1	0,76	0,62	0,54	0,49	0,45	0,43

Zahlentafel 24 a.

Tab. No. 24

Versuchswerte VI a

Zylinder
Rippenhöhe: 40 m/m

Vers. Nr.		7	8	9	10	11
Datum	1928	15.11	16.11	17.11	17.11	20.11
Stromstärke	amp	3,6	4,30	4,52	4,58	4,75
Spannung	Volt	18,8	22,4	23,6	23,7	24,7
Heizleistung	Kcal/h	58,2	83,0	91,6	93,4	101,0
Stromstärke i. Kasten	amp	2,40	2,40	2,40	2,48	2,60
Temp. im Zylinder	°C	150,1	149,7	149,8	150,3	150,2
Temp. der Oberfl. oben	"	84,0	58,7	47,1	36,8	33,8
" " " vorn	"	84,1	55,0	45,8	35,6	33,2
" " " Seite	"	88,8	58,1	49,2	38,6	33,8
" " " Seite	"	88,9	60,1	51,2	39,5	35,6
" " " hinten	"	87,5	61,9	52,0	40,3	37,8
Mittelwert gesamt	"	86,6	58,8	49,0	38,2	34,9
" " Zylinder	"	87,4	59,0	49,5	38,8	35,4
Temp. aussen	"	36,4	33,9	29,3	26,0	25,0
" aussen oben	"	37,5	27,0	26,0	25,2	24,6
" im Kasten	"	150,9	151,5	149,0	150,1	149,2
" " Raum	"	26,8	24,5	25,1	24,0	21,9
Umdr. des Gebläses	U/min	0	144	378	—	—
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	0,54	1,51	5,71	11,0
Temp. Differenz innen	°C	63,5	90,9	100,8	112,1	115,3
" " aussen oben	"	51,0	25,1	20,2	12,8	10,4
" " aussen	"	46,2	31,1	21,1	11,6	9,2
WÜZ innen	Kcal/m²h°	13,93	14,32	13,66	12,66	13,30
Gesamtwärme	Kcal/h	58,2	83,0	91,6	93,4	101,0
Wärmeabgabe oben	"	2,4	2,4	2,5	3,0	5,0
" der Rippenfl.	"	55,8	80,6	89,1	89,8	96,0
WÜZ " "	"	18,9	55,4	76,1	120,8	159,1

Zahlentafel 24 b.

eine gewisse Strecke im Material geführt werden konnten, so hat sich doch diese Befestigungsart gut bewährt und gleichmäßige Messungen ergeben.

Die Versuchswerte sind in Zahlentafel 24 und 25 und Abb. 48 und 49 gegeben. Die mittlere Luftgeschwindigkeit

Tab No. 25

Versuchswerte VI b

Zylinder
Rippenhöhe: 20 m/m

Vers. Nr.		1	2	3	4	5	6	7
Datum	1928	23.11	23.11	24.11	24.11	24.11	24.11	24.11
Stromstärke	Amp	3,25	3,88	4,25	4,25	4,40	4,55	4,79
Spannung	Volt	17,2	20,1	22,1	22,1	22,9	23,7	24,9
Heizleistung	kcal/h	48,1	67,1	80,9	80,9	83,7	92,6	102,5
Stromstärke im Kasten	Amp	2,0	2,2	2,38	2,45	2,50	2,50	2,57
Temp. im Zylinder	°	150,0	150,0	149,9	149,9	150,0	150,0	149,5
" der Oberfläche oben	°C	86,8	58,0	42,4	40,0	37,7	33,8	33,5
" " " vorn	"	88,1	60,2	46,0	43,5	41,1	38,0	37,1
" " " Seite	"	87,6	60,8	46,0	43,0	41,3	37,0	36,5
" " " Seite	"	88,0	62,9	49,1	46,1	43,5	39,4	37,6
" " " hinten	"	90,0	64,2	51,0	49,0	46,0	41,6	41,0
Mittelwert gesamt	"	88,1	61,2	46,9	44,3	41,7	37,9	37,1
" am Zylinder	"	88,2	62,0	48,0	45,4	42,9	39,0	38,0
Temp. außen	"	33,1	31,8	26,6	26,1	27,9	25,0	24,2
" außen oben	"	34,5	28,0	24,5	26,5	27,0	24,3	25,5
" im Kasten	"	149,0	149,0	150,0	150,8	150,2	151,1	150,5
" " Raum	"	25,2	25,1	24,2	26,2	26,5	23,0	22,0
" Diff. innen	"	61,9	88,8	103,0	105,6	108,3	112,1	112,4
" " außen oben	"	52,3	30,0	17,9	13,5	10,7	9,5	8,0
" " außen	"	55,1	30,2	27,4	17,3	15,0	14,0	13,8
Umdr. des Gebläses	U/min	0	1225	670.	1180	1772	2648	3595
Luftgeschwindigkeit	m/sec	0	0,9	2,6	4,65	7,0	10,5	14,25
W.Ü.Z. innen	kcal/m²h°	11,82	11,50	11,92	11,63	11,72	12,53	13,85
Gesamtwärmeabgabe	kcal/h	48,1	67,1	80,9	80,9	83,7	92,6	102,5
Wärmeabg. oben	"	2,7	4,8	3,0	3,4	3,9	5,0	5,5
" " der Rippen	"	45,4	64,3	77,9	77,5	79,8	87,6	97,0
W.Ü.Z. " "	kcal/m²h°	14,2	36,7	62,9	77,2	91,8	108	127
Extrapoliert bei W	m/sec	0	2	4	6	8	10	12
W.Ü.Z. rechnerisch	kcal/m²h°	20,9	56,7	91,6	125,6	159,9	193,5	226,7
W.Ü.Z. Versuch	"	21	54	74	87	98	106	113
f = a Vers. : a rechn.		~1	0,95	0,81	0,69	0,61	0,55	0,50
Mittel aus Vers. 1 u. 2	0	2	4	6	8	10	12	14
f	1	0,85	0,72	0,62	0,55	0,50	0,47	0,44

Zahlentafel 25.

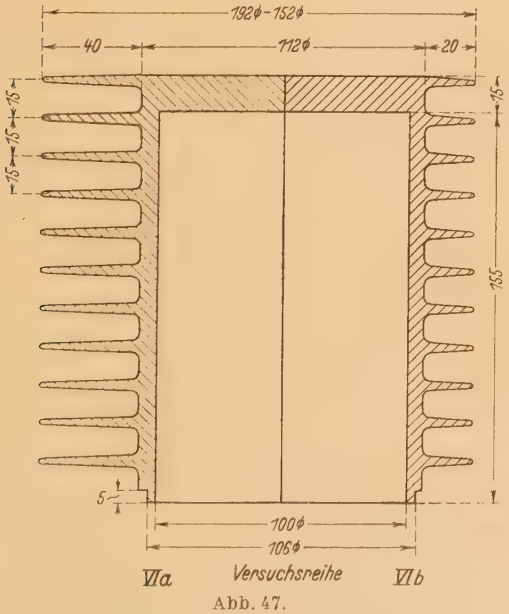


Abb. 47.

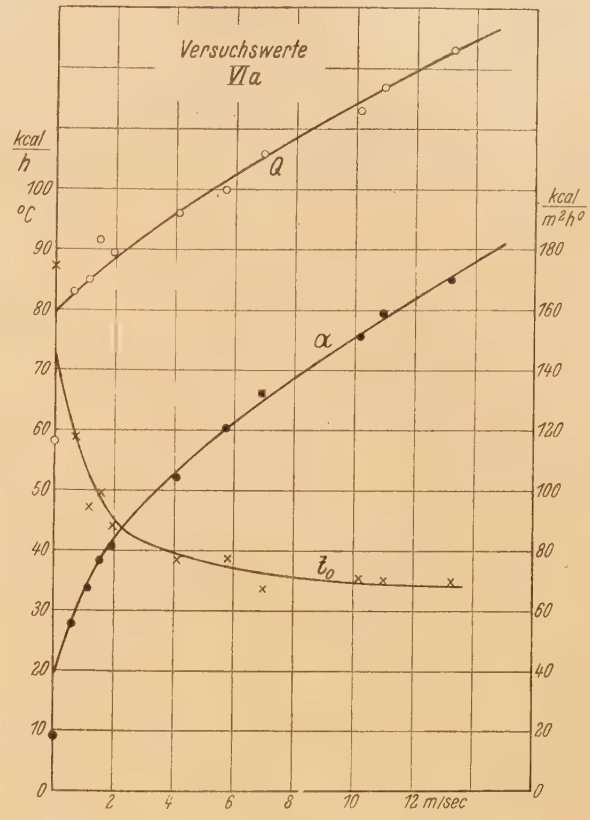


Abb. 48.

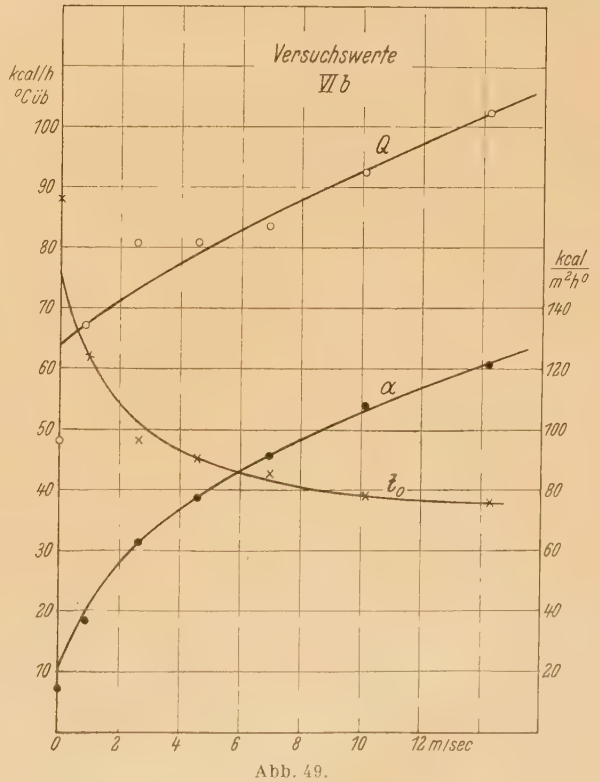


Abb. 49.

am Zylinder wurde so ermittelt, daß wie bisher aus der Umdrehungszahl des Gebläses die Geschwindigkeit im Querschnitt der Eichkurve entnommen wurde und dieser Wert mit dem Verengungsfaktor (freier Querschnitt: Gesamtquerschnitt = 1,5) multipliziert wurde. Um die Richtigkeit dieses Verfahrens nachzuprüfen, wurden einmal Kontrollmessungen mit dem Staurohr im Querschnitt um den Zylinder gemacht, die den Faktor zu 1,47 und 1,52, also rd. 1,5 versuchsmäßig ergaben; ferner wurden zwei Versuchsreihen (VIa, Nr. 10 und 11) mit abgenommenem Kanaloberteil ausgeführt, wobei die Geschwindigkeit auch mit dem Staurohr an dem Zylinder gemessen wurde. Die Versuchswerte dieser beiden Reihen fallen in die Kurve der im Kanal gemessenen Werte.

Die WÜZ der Rippenfläche ist so ermittelt, daß von der gemessenen Gesamtwärmeabgabe die Wärmeabgabe der Stirnfläche abgezogen wird und die Differenz durch die Fläche des Zylindermantels und die mittlere Temperaturdifferenz am Zylinder geteilt wird.

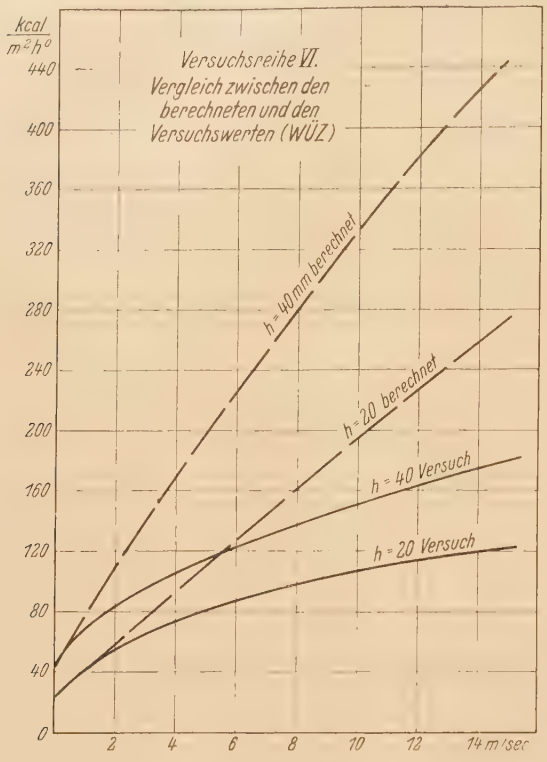


Abb. 50.

Für die Berechnung gelten folgende Werte:
VIa. $h = 0{,}004$; $d_m\pi = 0{,}478$; $\delta = 0{,}0025$ m,
VIb. $h = 0{,}002$: $d_m\pi = 0{,}415$; $\delta = 0{,}00325$,

$$F = 0{,}058\ \text{m}^2;\ F' = 0{,}0483;\ \frac{F'}{F} = 0{,}833,$$

$$n = 11.$$

Vergleicht man die so gewonnenen Zahlen (Abb. 50) mit den Versuchswerten, so läßt sich eine Funktion

$$\varphi = \frac{\alpha_{\text{vers}}}{\alpha_{\text{theor}}}$$

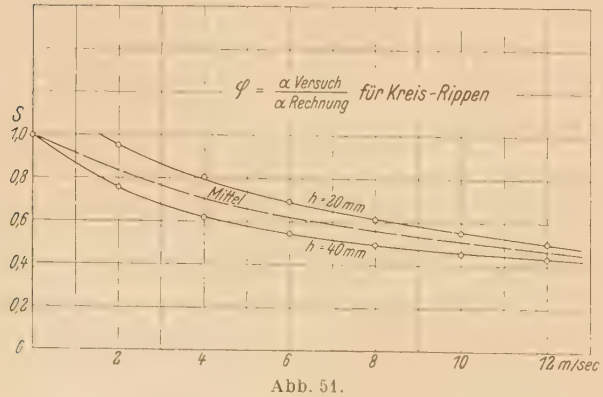


Abb. 51.

in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit darstellen (Abb. 51). Außer der Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit wird auch noch eine von der Rippenhöhe oder vom Durchmesser hinzukommen, deren Bestimmung späteren Versuchen überlassen bleiben muß.

Vorläufig genügt es, wenn die theoretisch ermittelten WÜZ für gerade Rippen mit einem Faktor multipliziert werden, der gegeben ist durch folgende Zahlen:

Für v =	0	2	4	6	8	10	12	14 m
φ:	1,0	0,85	0,72	0,62	0,55	0,50	0,47	0,44

Der Wert φ nähert sich schon bei $v = 12$ m/s einem Endwert, der für höhere Luftgeschwindigkeiten nicht mehr unterschritten wird (s. Abb. 51).

Für Kreisrippen gilt also

$$\alpha = \varphi\,(\alpha_R + \alpha')\ \text{kcal/m}^2\,h^0$$

$$\alpha_R = \frac{n}{F}\,\alpha\,d_m\pi\cdot\sqrt{2\,\alpha_0\cdot\delta\,\lambda}\cdot\mathfrak{Tang}\sqrt{\frac{2\,\alpha_0}{\lambda\,\delta}}\cdot h$$

$$\alpha' = \alpha_0\cdot\frac{F'}{F}$$

$$\alpha_0 = 5{,}3 + 4{,}55\cdot v$$

Die Abhängigkeit der WÜZ von der Luftgeschwindigkeit wird durch den Faktor φ gegenüber geraden Rippen verändert, so daß die Kurve mehr gekrümmt verläuft; im übrigen bleiben aber die Abhängigkeiten dieselben und die an geraden Rippen gewonnenen Erkenntnisse können qualitativ auf die Kreisrippen ohne Bedenken übertragen werden. Für den Abstand der Rippen voneinander gilt dasselbe wie oben (Versuchsreihe IV), nur daß der Wert l sinngemäß ersetzt werden muß. Für die Wärmeabgabe gilt für l der Wert $\varphi\cdot(\pi\,d_m)$. Für die Teilung ist jedoch zu beachten, daß zwei getrennte Stromzweige um den Zylinder herumführen, für jeden also $l = \frac{1}{2}\cdot\varphi\cdot\pi\cdot d_m$ einzusetzen wäre; es wird genügen, wenn bei der Bestimmung der Teilung für l der Durchmesser der Rippen eingesetzt wird.

Zusammenfassung.

In der Versuchsreihe I wird für den Wärmeübergang an einer unbearbeiteten gußeisernen Platte von $0{,}2\cdot 0{,}2$ m² bei 150° Innen- und 25° Außentemperatur die Beziehung gefunden,

$$\alpha_0 = 5{,}3 + 4{,}55\cdot v\ \text{kcal/m}^2\,h^0$$

gültig bis 12 m/s.

Die Versuchsreihe II bringt die Bestätigung der Anwendungsmöglichkeit der für einen freistehenden Stab von rechteckigem Querschnitt aufgestellten theoretischen Beziehungen für beliebige Rippen.

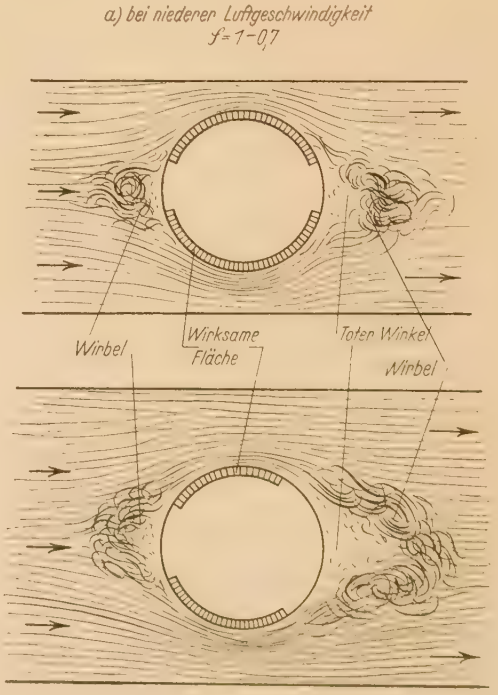


Abb. 52.

In Versuchsreihe III wird die Berechnung der Wärmeabgabe einer berippten Platte durch die Beziehung

$$\alpha = \frac{n}{F} \cdot l \cdot \sqrt{2\,\alpha_0\,\lambda\,\delta} \cdot \mathfrak{T}\mathrm{ang} \sqrt{\frac{2\,\alpha_0}{\lambda\,\delta}} \cdot h + \alpha_0 \cdot \frac{F'}{F}$$

versuchsmäßig nachgeprüft, wobei die errechneten und die Versuchswerte sehr gute Übereinstimmung ergeben. Es zeigt sich, daß die Wärmeabgabe zuerst steil ansteigt, um mit wachsender Rippenhöhe oder wachsender Luftgeschwindigkeit allmählich flacher zu verlaufen. Unter Berücksichtigung des Rippengewichtes ergibt sich für jede Luftgeschwindigkeit eine wirtschaftliche Rippenhöhe, deren Überschreitung zwar noch einen Zuwachs an Wärmeabgabe, aber nur mit verschlechtertem Materialwirkungsgrad bringt.

Die Versuchsreihe IV ergibt Beziehungen für den günstigsten Rippenabstand, die sich mit der Grenzschichttheorie in Einklang bringen lassen. Die gefundene Beziehung

$$a = 12{,}63 \left(\frac{1}{v}\right)^{0{,}5} \text{ mm}$$

ähnelt der von Kármán aufgestellten Gleichung über die Dicke der Grenzschicht bei turbulenter Strömung.

Versuchsreihe V bringt den Vergleich zwischen Aluminium und Gußeisen. Der Unterschied der Wärmeleitzahl wirkt sich, wie die theoretische Betrachtung und die Versuche ergeben, erst bei größeren Rippenhöhen aus. In diesem Fall kommt zu der Gewichtsersparnis auf Grund der verschiedenen spezifischen Gewichte, die durch besseren Wärmeübergang hinzu.

In Versuchsreihe VI werden Zylinder untersucht, um die Möglichkeit der Anwendung der Formel für gerade Rippen nachzuprüfen. Die Abweichung der Versuchswerte von den theoretischen für gerade Rippen wird durch eine Funktion von der Luftgeschwindigkeit (φ) wiedergegeben. Diese Abweichung wird mit der Störung der Strömung am Zylinder durch Wirbelbildung begründet. Der Faktor φ ist für $v =$ 0 m/s = 1 und nähert sich bei höherer Luftgeschwindigkeit einem Endwert, der bei 0,4 liegt.

Vergleich mit ähnlichen Versuchen.

Zum Vergleich mit den Versuchsergebnissen können folgende Unterlagen herangezogen werden: Versuche von Föge, Hannover, zur Ermittlung der günstigsten Rippenabmessungen geben für ihre Rauchgasvorwärmer als günstigste Rippenhöhe 45 mm bei einer Luftgeschwindigkeit von ca. 4 m/s. Dieser Wert würde der wirtschaftlichen Rippenhöhe in Abb. 36 entsprechen.

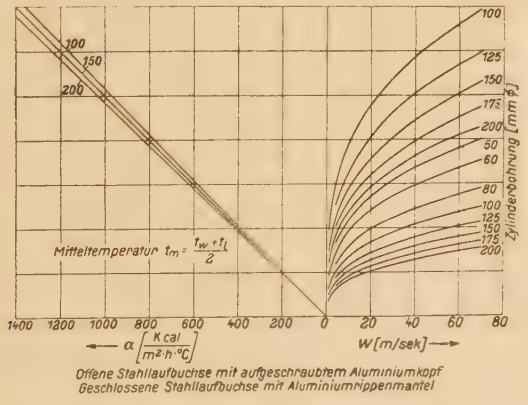


Abb. 53.

Schilde, Hersfeld, weist in seinen Angeboten darauf hin, daß die Rippenrohre mit niedrigen Rippen (14 und 25 mm) nur für hohe Luftgeschwindigkeiten, die Rohre mit Rippenhöhe von 29 bis 45 mm dagegen bei natürlicher Luftbewegung verwendet werden sollen. Diese Angaben decken sich mit den Ergebnissen der Versuche.

Die WÜZ, die Goßlau in seinen Versuchen an den luftgekühlten Zylindern der Siemens-Flugmotoren ermittelt, ist auf folgende Weise errechnet: Geheizt wird in den untersuchten Zylindern der Kompressionsraum, und die WÜZ wird nur bezogen auf die Oberfläche des Kompressionsraumes. Da aber bei den Versuchen an der Wärmeabgabe auch die Zylinderwand beteiligt ist, müssen die angegebenen Zahlen zu hoch herauskommen, da die Wärmeabgabe der Zylinderwand in die der Oberfläche des Verbrennungsraumes mit hineinbezogen ist. Bei der Anwendung der Goßlauschen Zahlen für die wärmetechnische Berechnung von Flugzeugmotoren der angegebenen Ausführungsformen fällt der getroffene Ansatz wieder heraus, so daß einwandfreie Ergebnisse herauskommen. Die allgemeine Anwendung dieser Zahlen ist aber nicht zulässig, da sie für alle übrigen Fälle wegen der getroffenen Berechnungsart zu hoch liegen. Hieraus erklärt sich auch die starke Abhängigkeit vom Zylinderdurchmesser, der bei Berücksichtigung der Gesamtfläche in dem fraglichen Bereich von geringem oder gar keinem Einfluß ist. Die Tendenz der Kurven ist bei den Goßlauschen Versuchen dieselbe wie in der Versuchsreihe 6 (Abb. 53).

Berechnungsunterlagen.

Aus den Versuchen können folgende Berechnungsangaben zusammengestellt werden:

1. Wahl der Rippenhöhe.

Auf Grund der zu erwartenden Luftgeschwindigkeit kann die Rippenhöhe aus der Abb. 54 entnommen werden.

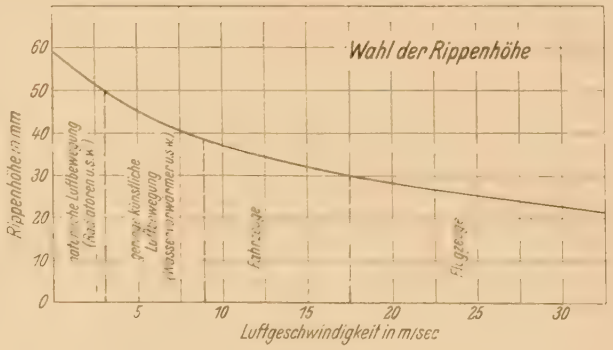


Abb. 54.

Die Kurve dient nur dazu, der weiteren Durchrechnung den ungefähren Wert der Rippenhöhe zugrunde legen zu können.

2. Abstand der Rippen.

Die Rippenhöhe und der Durchmesser des Zylinders, auf den die Rippen aufgesetzt werden sollen, ergeben den Durchmesser der Rippe. Für diesen Durchmesser oder bei geraden Rippen für ihre Länge kann die günstigste Teilung bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten der Abb. 55 entnommen werden. Diese Kurve ist mit den Werten der Versuchsreihe IV errechnet.

3. Stärke der Rippen.

Die Stärke der Rippe am Fuß ergibt sich bei dreieckigem Profil, das möglichst immer anzuwenden ist, aus Abb. 56. Meistens bleibt der gefundene Wert unter dem konstruktiv oder gießtechnisch zulässigen; dann ist die Stärke so klein, wie ausführbar zu nehmen, die gewählte Rippenform und die Stärke am Fuß ergibt die mittlere Rippenstärke.

4. Berechnung der WÜZ.

Die WÜZ berechnet sich jetzt aus

$$\alpha = \varphi \left| \frac{n}{F} \cdot d_m \pi \cdot \sqrt{2\,\alpha_0\,\lambda\,\delta} \cdot \mathfrak{T}\mathrm{ang} \sqrt{\frac{2\,\alpha_0}{\lambda\,\delta}} \cdot h + \right.$$

$$\left. + \alpha_0 \cdot \frac{F'}{F} \right| \text{kcal/m}^2\,h^0$$

worin φ für gerade Rippen $(d_m \pi = l) = 1$ ist, ebenso für Kreisringrippen bei einer Luftgeschwindigkeit $v = 0$. Aus der WÜZ kann der Wärmedurchgang oder die Wandtemperatur bestimmt werden, vorausgesetzt, daß die Verhältnisse auf der anderen Wandseite bekannt sind.

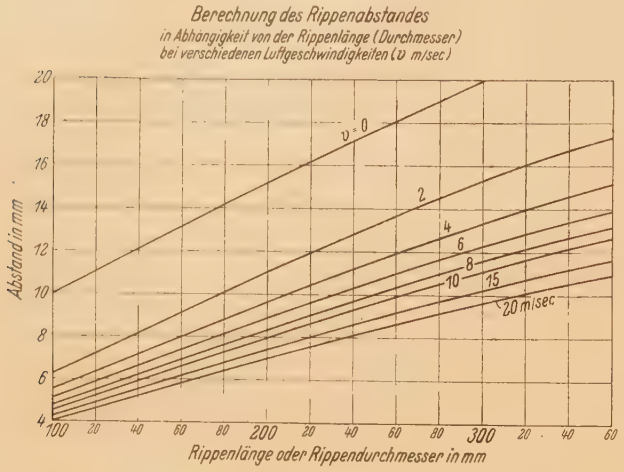


Abb. 55.

Wird die WDZ zu klein oder die Wandtemperatur zu groß, so muß die Rippenhöhe vergrößert werden. Im anderen Fall kann sie kleiner angenommen werden; die Rechnung ist dann mit der angegebenen Formel noch einmal durchzuführen.

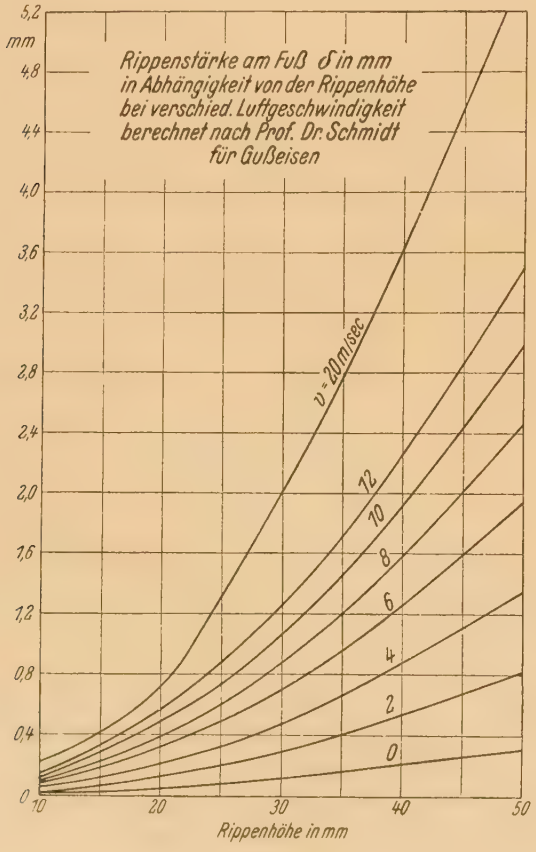


Abb. 56.

Die Versuche haben wertvolle Beziehungen zwischen den Rippenabmessungen und den Wärmeübergangszahlen in Anlehnung an die theoretischen Grundlagen ergeben. Bei den vielen Einflüssen, die hierbei mitsprechen und von denen manche außer acht gelassen werden mußten, um zunächst zu Teilergebnissen zu kommen, können die angegebenen Berechnungsunterlagen naturgemäß nur vorläufige sein, bis durch weitere Arbeiten auf diesem Gebiet alle Abhängigkeiten genügend geklärt werden.

Jeder längere Weg muß in Etappen zurückgelegt werden und eine solche Etappe hofft diese Arbeit zu sein.

Literaturverzeichnis.

Alphabetisch.

Bosch, Dipl.-Ing. M. ten, Die Wärmeübertragung. Berlin, Springer 1927.

Burgeß und Chatelier, Die Messung hoher Temperaturen. Berlin, Springer 1913.

Bussien, Rich., Automobiltechnisches Handbuch. Berlin, Krayn 1928.

Gibson, Dr. A. H., Die Luftkühlung von Benzinmotoren. Engineering 1920, S. 211.

Goßlau, Dr.-Ing., Rechnerische und experimentelle Untersuchungen über Wärmebeherrschung und Leistungssteigerung in luftgekühlten Flugmotor-Zylindern, Siemens-Sonderdruck (auszugsweise in der Z.d.V.D.I. 1928 und »Motorwagen« 1928.

Gröber, Dr.-Ing. H., Einführung in die Lehre von der Wärmeübertragung, Berlin, Springer 1926.

Hanfland, Ing. Kurt, Das Motorrad und seine Konstruktion. Berlin, Krayn 1925.

Hayashi, Dr.-Ing. Keiichi, Fünfstellige Tafeln der Kreis und Hyperbelfunktionen. W. D. Gruyter 1921.

Jürges, Dr.-Ing. Walter, Der Wärmeübergang an einer ebenen Wand. Beih. z. Gesundh.-Ing., München, Oldenbourg 1924.

Kármán, Prof. Dr., Über laminare und turbulente Reibung, Abhandlungen aus dem Aerodynamischen Institut. Aachen, Berlin, Springer.

Katz, Dr.-Ing. Hans, Neuzeitliche Flugmotoren. Berlin, Schmidt 1928.

Lacoin, Louis, Construction et Réglage du Moteur à explosions, Paris, Eyrolles 1921.

Maßmann, Dipl.-Ing., Berechnung der Heizflächen von schmiedeeisernen Rippenrohren. Archiv für Wärmewirtschaft 1926.

Merkel, Dr.-Ing. Friedrich, Die Wärmeübertragung. Berlin, Springer 1927.

Nusselt, Prof. Dr. W., Die Isolierfähigkeit von Luftschichten, Forschungsheft 63. Berlin, Springer 1909.

Ott, Dipl.-Ing. Ludwig, Untersuchungen zur Frage der Erwärmung elektrischer Maschinen, Forschungsheft 36. Berlin, Springer 1906.

Poensgen, Dipl.-Ing. Richard, Ein technisches Verfahren zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit plattenförmiger Stoffe, Forschungsheft 130. Berlin, Springer 1913.

Praetorius, Die Kühlung leichter Verbrennungsmotoren. Berlin, Krayn 1920.

Reiher, Dr.-Ing. H., Wärmeübergang von strömender Luft an Rohre und Röhrenbündel im Kreuzstrom, Forschungsheft 269, Berlin, Springer 1925.

Schmidt, Prof. Dr. Ing. E., Die Wärmeübertragung durch Rippen, Z.d.V.D.I. 1926, S. 889.

Schmidt, Prof. Dr.-Ing., Wärmestrahlung technischer Oberflächen bei gewöhnlicher Temperatur. München, Oldenbourg 1927.

Schwarz, Dr.-Ing., Die Theorie des Kühlbleches, Z. f. Elektrotechnik und Maschinenbau 1923, Heft 31.

Vidmar, Das Wärmestrahlungsproblem des Transformators, Z. f. Elektrotechnik und Maschinenbau 1921, S. 256.

Wamsler, Dr.-Ing. Friedr., Die Wärmeabgabe geheizter Körper an Luft. Forschungsheft 98, Berlin, Springer 1911.

Wolf, Die Berechnung von Kühlrippen. Gesundh.-Ing. 1925.

Während der Drucklegung erschien:

Repky, Dr.-Ing. H., Die Wärmeübertragung von Heizflächen mit Rippen. Stuttgart, Wedekind.

Lebenslauf.

Ich bin am 23. November 1898 als Sohn des Pastors Carl Wagener zu Breslau geboren, besuchte das Realgymnasium bis zum Abiturium, nahm von 1916 bis 1918 am Feldzuge teil.

Ich studierte an der Technischen Hochschule zu Breslau in der Fakultät für Maschinenwirtschaft, arbeitete inzwischen ein Jahr praktisch und bestand im Juli 1923 die Diplom-Hauptprüfung.

Von da ab bin ich Assistent am Maschinen-Laboratorium der Technischen Hochschule zu Breslau.

Breslau, den 1. Februar 1929.

Dipl.-Ing. Georg Wagener.